

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv zaoblení ostří na průběh opotřebení a trvanlivost řezného  
nástroje

Influence of Cutting Edge Radius on Wear and Durability of Cutting  
Tool

Student:

Bc. Ondřej Haas

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Haas**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Vliv zaoblení ostří na průběh opotřebení a trvanlivost řezného nástroje**  
**Influence of Cutting Edge Radius on Wear and Durability of Cutting Tool**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Obecná charakteristika dané problematiky.
3. Návrh experimentálních činností a jejich provedení.
4. Zhodnocení naměřených dat, zpracování výsledků.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] ERDL, BERT P. *High-speed machining*. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015  
Datum odevzdání: 16.05.2016



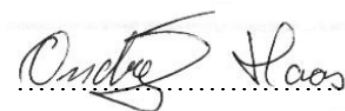
  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016

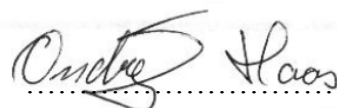
Handwritten signature of Ondřej Haas in black ink, written over a dotted line.

podpis studenta

## Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odstavec 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odstavec 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB- TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/198 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16. 5. 2016



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Haas

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hlavnice 84, 747 52, okr. Opava

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAAS, O. *Vliv zaoblení ostří na průběh opotřebení a trvanlivost řezného nástroje: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 84 s. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá stanovením vlivu poloměru zaoblení ostří na průběh opotřebení a trvanlivost řezného nástroje v průběhu obrábění. V úvodu práce je popsán současný stav obrábění hliníku a hliníkových slitin, proces a produktivita opracování a následné možné důsledky opotřebení nástroje při obrábění hliníku. Dále je pak v teoretické části práce názorně popsána technologie a proces zaoblení břitu řezného nástroje. Experimentální část práce je zaměřena na obrábění hliníkové slitiny AW-2014 řezným nástrojem s odlišným poloměrem zaoblení ostří *VBD* a vliv technologických parametrů obrábění na průběh a velikost opotřebení řezného nástroje. Pro vyhodnocení experimentální činnosti byl také zvolen parametr integrity povrchu, a to drsnost obrobeného povrchu a tvar odcházející třísky.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

HAAS, O. *Influence of Cutting Edge Radius on Wear and Durability of Cutting Tool: Master Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 84 p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

The thesis deals with the determination of the influence of cutting edge radius on the progression of wear and durability of cutting tools during machining. The introduction describes the current machining of aluminium and aluminium alloys, process and productivity machining and subsequent possible consequences tool wear when machining aluminium. Furthermore, it is then in the theoretical part of work clearly describes technology and process roundness cutting edge of the cutting tool. The experimental part of work is focused on the machining of aluminium alloy AW-2014 cutting tool with a different cutting edge roundness radius *VBD* and influence of technological parameters of machining on course and size of wear of cutting tools. For evaluation of experimental activities was also elected parameter of surface integrity, and it roughness of machined surface and shape leaving chips.

## OBSAH

<b>SEZNAM ZNAČENÍ.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1. SOUČASNÝ STAV OBRÁBĚNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN.....</b>	<b>12</b>
1.1 Strukturní a fyzikální vlastnosti hliníku a jeho slitin .....	13
1.1.1 Stručná charakteristika hliníku a jeho slitin.....	13
1.2 Proces a produktivita obrábění hliníku .....	16
1.2.1 Obrobitelnost hliníku a jeho slitin .....	17
1.2.2 Silové poměry a vznik třísky při obrábění.....	18
1.2.3 Geometrie a řezné nástroje .....	21
1.2.4 Řezné podmínky soustružení hliníku a jeho slitin .....	22
1.3 Opotřebení a trvanlivost nástroje .....	25
1.3.1 Opotřebení na hřbetu nástroje .....	28
1.3.2 Opotřebení ve tvaru žlábků .....	28
1.3.3 Tvorba nárůstku na hřbetě nástroje .....	29
1.3.4 Plastická deformace špičky .....	29
<b>2. TECHNOLOGIE ZAOBLENÍ BŘITU.....</b>	<b>30</b>
2.1 Tvar a velikost VBD .....	33
2.2 Hodnocení kvalitativních parametrů nástroje .....	33
2.2.1 Dotykové metody.....	34
2.2.2 Bezdotykové metody .....	35
2.3 Geometrie břitů .....	36
2.4 Způsoby úpravy ostří.....	38
2.4.1 Omílání .....	38
2.4.2 Kartáčování.....	39
2.4.3 Pískování.....	39
2.4.4 Otryskávání.....	40
2.4.5 Chemické čištění.....	40
2.4.6 Iontové čištění.....	40
2.5 Vliv úpravy břitů nástroje na proces obrábění .....	41
<b>3. STANOVENÍ VLIVU ZAOBLENÍ OSTŘÍ NA PRŮBĚH OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOSTI NÁSTROJE.....</b>	<b>42</b>
3.1 Charakteristika objemového opotřebení nástroje.....	42

3.1.1	Objemové opotřebení u ostrého břitu .....	42
3.1.2	Objemové opotřebení u břitu s fazetkou .....	43
3.1.3	Objemové opotřebení u rektifikovaného ostří .....	45
<b>4.</b>	<b>NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI .....</b>	<b>49</b>
4.1	Slitina hliníku AW-2014 .....	49
4.2	Volba obráběcího stroje a upnutí obrobku .....	50
4.3	Volba řezného nástroje .....	51
4.3.1	Nástroje ze slinutého karbidu .....	52
4.4	Geometrie řezného nástroje .....	52
4.5	Volba řezných podmínek .....	57
4.6	Schéma provedeního experimentu .....	58
<b>5.</b>	<b>STANOVENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI .....</b>	<b>59</b>
5.1	Tvorba a tvarování třísky .....	59
5.2	Opotřebení a trvanlivost řezného nástroje .....	61
5.2.1	Kritéria opotřebení řezného nástroje .....	62
5.2.2	Vyhodnocení opotřebení ostří řezného nástroje .....	62
5.2.3	Stanovení mechanismů opotřebení řezného nástroje .....	68
5.2.4	Vliv opotřebení na trvanlivost řezného nástroje .....	69
5.3	Parametr integrity povrchu .....	70
5.3.1	Stanovení vybraných parametrů drsnosti povrchu .....	71
	<b>ZÁVĚR A DOPORUČENÍ .....</b>	<b>77</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>84</b>

## SEZNAM ZNAČENÍ

Značka	Význam	Jednotka
$A_5$	tažnost	[%]
A, B, C	plocha opotřebení nástroje	[-]
$A_\alpha$	plocha hlavního hřbetu řezného nástroje	[ $\mu\text{m}$ ]
$A'_\alpha$	plocha vedlejšího hřbetu řezného nástroje	[ $\mu\text{m}$ ]
$A_\gamma$	plocha čela řezného nástroje	[ $\mu\text{m}$ ]
BMT	vestavěný motor	[-]
CNC	computer numeric control – číslicové řízení	[-]
F	výsledná síla řezání	[N]
$F_c$	řezná složka síly řezání	[N]
$F_f$	posuvová složka síly řezání	[N]
$F_p$	pasivní složka síly řezání	[N]
Ga, Gr	úhly nástrojového držáku	[°]
K	tvarový faktor zaoblení ostří	[-]
KT	hloubka žlábků	[ $\mu\text{m}$ ]
KF	vzdálenost žlábků od čela	[ $\mu\text{m}$ ]
KM	střední vzdálenost žlábků	[ $\mu\text{m}$ ]
$K_{Vo}$	objemový součinitel třísek	[-]
K12	plošně centrovaná mřížka	[-]
O, M, N	body ohraničující primární plastickou deformaci	[-]
Q	množství odebraného materiálu	[ $\text{cm}^3$ ]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_m$	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	mez kluzu	[MPa]
Rz	nejvyšší výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{S}$	střední velikost zaoblení ostří	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_A$	plocha opotřebení nástroje ostrého břitů	[ $\text{mm}^2$ ]
$S_B$	plocha opotřebení nástroje břitů s fazetkou	[ $\text{mm}^2$ ]
$S_C$	plocha opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří	[ $\text{mm}^2$ ]
$S_1, S_2$	obsah pravoúhlého trojúhelníku	[ $\text{mm}^2$ ]
$S_\alpha$	velikost zaoblení na hřbetní ploše	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_\gamma$	velikost zaoblení na čelní ploše	[ $\mu\text{m}$ ]



SK	slinutý karbid	[-]
T	trvanlivost	[min]
U	rozšířená nejistota	[~]
$U_C$	rozšířená kombinovaná nejistota	[~]
$V_A$	objem opotřebení nástroje ostrého břitu	[mm <sup>3</sup> ]
$V_B$	objem opotřebení nástroje břitu s fazetkou	[mm <sup>3</sup> ]
$V_C$	objem opotřebení nástroje u rektifikovaného ostří	[mm <sup>3</sup> ]
VB	opotřebení na hřbetě	[μm]
$VB_C$	opotřebení v oblasti špičky	[μm]
$VB_N$	opotřebení ve formě vrubu	[μm]
$VB_B$	opotřebení přímé části ostří (průměrné)	[μm]
$VB_{Bmax.}$	maximální opotřebení nástroje	[μm]
$VB_{krit}$	kriteriální opotřebení nástroje	[μm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
$V_m$	objem odřezávaného materiálu	[-]
VR	radiální opotřebení nástroje	[μm]
$V_t$	objem třísek	[-]
Z	životnost nástroje	[min]
$Z_{pmax}$	maximální výška profilu	[μm]
$Z_{Vmax}$	maximální hloubka profilu	[μm]
1D	„jednorozměrný“	[-]
3D	„trojrozměrný“	[-]
a	délka fazetky	[mm]
$a_p$	hloubka řezu	[mm]
c	měrná tepelná kapacita	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c_T, c_V$	konstanta	[-]
f	posuv	[mm]
h, b, $l_1$ , $l_2$ , f	rozměry nástrojového držáku	[mm]
i	počet třísek odebraného materiálu	[-]
$k_s$	přepočtový koeficient	[-]
$k_U$	koeficient rozšíření	[-]
ln	vyhodnocována délka profilu	[mm]
lr	základní délka profilu	[mm]
m	exponent	[-]

$n$	počet měření	[-]
$q$	počet použitelných břitů destičky	[-]
$r$	poloměr zaoblení špičky	[mm]
$r_n$	poloměr zaoblení ostří	[ $\mu\text{m}$ ]
$r_\varepsilon$	poloměr zaoblení špičky	[mm]
$s(x)$	výběrová směrodatná odchylka	[~]
$t_{As}, t$	jednotkový strojní čas	[min]
$u_A, u_{Ak}$	standardní nejistota typu A	[~]
$u_B$	standardní nejistota typu B	[~]
$u_C$	kombinovaná standardní nejistota	[~]
$v_c$	řezná rychlost	[ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$x$	hloubka opotřebení	[mm]
$\bar{x}$	výběrový průměr	[~]
$x_i$	jednotlivé naměřené hodnoty	[~]
$\alpha$	úhel hřbetu	[°]
$\gamma$	úhel čela	[°]
$\varepsilon$	úhel fazetky	[°]
$\lambda$	tepelná vodivost	[ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$\lambda C$	profilový filtr	[mm]
$\rho$	hustota obráběného materiálu	[ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
$\Phi$	oddělení segmentu třísky	[°]
$\Phi_1$	posuv vrstev v kluzných rovinách	[°]
$\Psi$	rozdíl dvou úhlů	[°]

## ÚVOD

Předmětem diplomové práce se stala studie vlivu zaoblení ostří na opotřebení a trvanlivost řezného nástroje. Všechny potřebné nástroje pro zpracování této práce poskytla firma Pramet Tools, s.r.o., která se specializuje na výrobu nástrojů s *VBD* ze slinutého karbidu. V úvodu diplomové práce byla názorně popsána problematika obrábění hliníkových slitin. Požadavky, které jsou kladené na nástroje, nemohou být zcela totožné jako při opracování oceli nebo jiných materiálů. Je potřeba volit odpovídající geometrii řezného nástroje a řezné podmínky. U technologie zaoblení břitů se zdá být nejdůležitější samotná příprava ostří. Proto všechny vady je potřeba vyloučit již v počátku přípravy břítu.

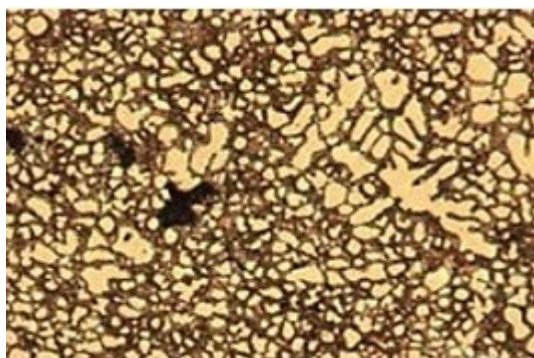
Ve výrobě se stále více setkáváme s rostoucími požadavky na řezné nástroje. Samotná řezivost je ovlivněna mnoha faktory. Patří zde i zkoumané zaoblení ostří nástroje. Ve většině soustružnických operací není výhodné používat ostrý břit nástroje, jelikož má větší tendenci k prasknutí. Nicméně u měkčích materiálů se ostrý břit aplikuje, a to například u hliníku. Také je potřeba se zabývat otázkou, jak snížit opotřebení řezných nástrojů a tím pádem zvýšit jejich trvanlivost. Opotřebení nástroje se nelze zcela vyhnout, ale snahou by mělo být toto opotřebení minimalizovat. Jedním z nejčastějších způsobů nízké trvanlivosti nástroje bývá nedodržení správných řezných parametrů.

V experimentální činnosti byla zvolena pro obrábění slitina hliníku AW-2014. V dnešní době, v oblasti neželezných kovů, najdeme hliník a jeho slitiny mezi nejpoužívanějšími materiály. Hliník a slitiny hliníku najdou své zastoupení ve všech průmyslových odvětvích, nejvíce však v automobilovém a leteckém průmyslu díky velmi nízké hmotnosti a mechanickým vlastnostem. Lze se s ním setkat takřka v každodenním životě. Z pohledu obrábění, lze opracování hliníkových slitin považovat víceméně za bezproblémové. Musí se však volit správné řezné podmínky. Je všeobecně známo, že největší vliv na opotřebení řezných nástrojů má řezná rychlost a následně posuv. Důležitým faktorem je také volba nástrojového materiálu. Ve výrobě je nejčastěji používán slinutý karbid a diamant.

Experimentální část práce se skládá ze dvou oblastí. Nejdříve je teoreticky popsáno objemové opotřebení ostrého břítu, břítu s fazetkou a rektifikovaného ostří. Druhá část je věnována především vyhodnocení vybraných veličin opotřebení a drsnosti povrchu. Při vyhodnocení se používá zcela odlišný postup, než u oceli nebo jiných materiálů. Všechny výsledky byly zaznamenány do tabulek a průběhy následně vyneseny do grafů.

## 1. SOUČASNÝ STAV OBRÁBĚNÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN

Obrábění hliníku a jeho slitin vyžaduje zcela odlišný přístup při volbě nástroje, než u obrábění oceli nebo litiny. Z těchto důvodů je nutno vytvořit optimální pracovní podmínky zejména z hlediska použitého řezného materiálu, tvarů a typů použitých obráběcích nástrojů, jejich geometrie břitů a aplikaci tenkých vrstev. U hliníkových slitin se mohou vytvářet nežádoucí nárůstky na břitu nástroje, proto jsou aplikovány kluzné vrstvy nepodporující jeho vznik. [21]



*Obr. 1.1 Charakteristický strukturní stav lité hliníkové slitiny [21]*

V praxi se setkáváme s rostoucím počtem aplikací hliníkových součástí, které jsou vyráběny z hliníkových odlitků třískovým obráběním - jde například o bloky motorů, válce, hlavy motorů, kola a další. S tím úzce souvisí i snaha výrobců o ekonomické a ekologické obrábění těchto součástí. Vysoká tepelná roztažnost hliníku má za následek tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě tavení vznikají problémy s utvářením třísky, jejím odvodem a nalepováním na břit, eventuálně na čelní plochu řezného nástroje. Problém nalepování hliníku při obrábění standardními řeznými nástroji ze slinutého karbidu je všeobecně známý. Tendence k nalepování stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu, rostoucím obsahem kobaltu a rostoucí drsností břitu. Zvýšení kteréhokoli uvedeného parametru se projeví ve zvýšeném nalepování hliníku na řezný nástroj. U nástrojů s povrchovou úpravou diamantovým mikroleštěním se v důsledku nižší drsnosti adheze snižuje. Další nalepování hliníku omezuje aplikace ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření. Obdobný antiadhezní účinek mají i diamantové povlaky nebo polykrystalický diamant. Aplikace těchto materiálů je nejvhodnější pro obrábění hliníkových slitin s vyšším obsahem křemíku, a to z důvodu nízké afinity a adheze uhlíku a hliníku a vysoké otěruvzdornosti diamantu. [22]

Při obrábění slitin hliníku jsou teploty působící na nástroj poměrně nízké. To je způsobeno především vysokou tepelnou vodivostí hliníku, proto víceméně ve většině případů, tyto slitiny lze obrábět bez výraznějších problémů. Chemické reaktivní problémy se při obrábění hliníku obvykle nevyskytují. [15]

Některé ze slitin hliníku jsou úspěšně obráběny bez procesních kapalin, zde ale není dosahováno nejlepších výsledků. Z tohoto důvodu je aplikace procesních kapalin vyžadována. Vysoké množství křemíku u hliníkových slitin může vyvolat silný abrazivní účinek na řezný nástroj. U hliníku a hliníkových slitin je často obtížné získat jemnou strukturu povrchu. Opotřebení nástroje je v tomto případě nevyhnutelné, nesmí však k tomuto kroku docházet za krátký čas používání řezného nástroje. Pro dosahování nejlepších výsledků je doporučeno obrábět diamantovým řezným nástrojem. [15]

## 1.1 Strukturní a fyzikální vlastnosti hliníku a jeho slitin

Rychlý růst výroby a spotřeby hliníku v posledních letech nemá, a to až na titan a jeho slitiny, ve světě obdobu. Odpověď na tuto otázku, proč je tomu tak, je potřebné hledat ve vlastnostech nejen hliníku a jeho slitin, ale i nekonvenčně vyrobených materiálů na bázi hliníku. Jde o velmi výhodnou kombinaci fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností, které umožňují aplikaci hliníkových materiálů ve všech oblastech lidské činnosti. Není tajemstvím, že hliník se vzhledem k vysoké hodnotě spalného tepla aplikuje při svařování. [1]

### 1.1.1 Stručná charakteristika hliníku a jeho slitin

Chemickou značkou hliníku je Al (lat. Aluminium). Hliník je kov bílé barvy, vysoké tepelné a elektrické vodivosti s vysokou hustotou měrného tepla tání. Hliník a jeho slitiny se vyznačují velmi vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Dané pevnostní charakteristiky je možné intenzivním tvářením zvýšit. Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku  $K12$ , v důsledku toho má hliník a jeho slitiny dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Hustota  $2699 \text{ kg.m}^{-3}$ , teplota tavení  $660 \text{ }^{\circ}\text{C}$  při čistotě 99,99 %. Nejvýznamnější vlastností hliníku je jeho poměrná stálost na vzduchu. Pro zjemnění zrna se přidávají malá množství prvků, například Ti, Zr, Ta. [23]

Fyzikální vlastnosti, uvedené v tab. 1.1, se využívají v jednotlivých oborech. Například účinný průřez pro neutrony se využívá v aplikaci slitin v jaderné energetice, elektrická vodivost v elektrotechnice, tepelná vodivost v energetickém průmyslu. [1]

Tab. 1.1 Některé fyzikální vlastnosti hliníku [1]

Vlastnosti	Hodnoty
Mřížka	K12
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g.cm}^{-3}$ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	$247 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (při 25 °C)
Elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8) 65 – 66 % IACS (Al 99,999+)
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,5 %
Spalné teplo	$31,05 \text{ MJ.kg}^{-1}$
Teplota supravodivosti	1,2 K

Tab. 1.2 Hodnoty teplotní roztažnosti hliníku [1]

Teplotní interval [°C]	Průměrný koeficient [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- 200 až 20	18,0
- 150 až 20	19,9
- 50 až 20	21,8
20 až 100	23,6
20 až 200	24,5
20 až 300	25,5
20 až 400	26,4
20 až 500	27,4

Změnou chemického složení je docíleno většího využití hliníkových slitin. Změna je dosažena nalegováním jedním nebo více prvků. Správnou kombinací prvků dojde ke změně původních vlastností hliníku. Tím je docíleno lepších chemických, pevnostních, technologických a fyzikálních vlastností. Rozdělení slitin hliníku je hned několik a záleží jen na volbě daného kritéria. [2]

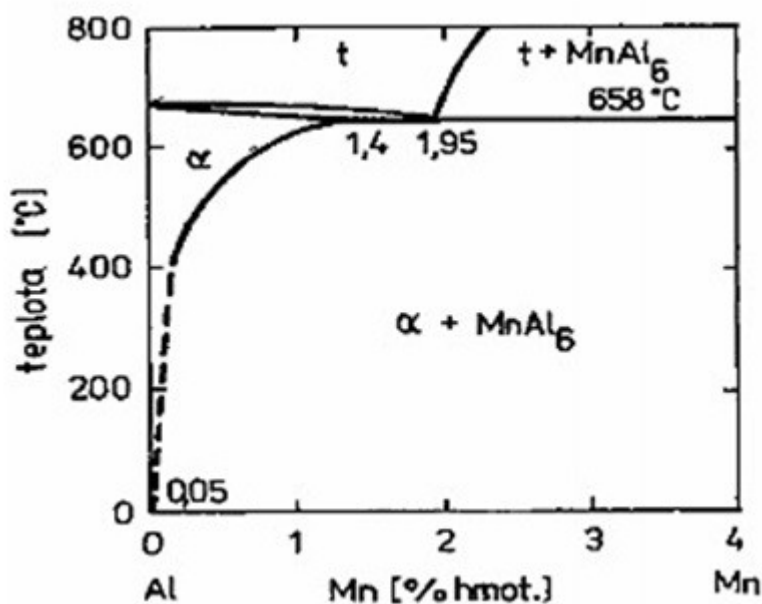
Podle vhodnosti způsobu výroby se slitiny hliníku dělí: [2]

- slitiny hliníku pro tváření
- slitiny hliníku pro odlitky

### Slitiny hliníku pro tváření

#### Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi:

Slitiny hliníku, pokud neobsahují měď, dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám s vysokou kyselostí. Zde můžeme zařadit slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Slitiny se vyznačují velkou odolností proti korozi i bez použití povrchové ochrany. Nemohou se však tepelně zpracovat za účelem zpevnění materiálu, což lze zařadit mezi velkou nevýhodu. Mezi výhody patří tvářitelnost, svařitelnost, lomová houževnatost a odolnost proti vibračnímu zatížení. [3]



Obr. 1.2 Soustava Al-Mn [3]

#### Slitiny s vyšší a vysokou pevností, ale s nízkou odolností proti korozi:

Slitiny Al-Zn-Mg a Al-Zn-Mg-Cu patří mezi vytvrditelné slitiny. Obsah zinku se obvykle pohybuje v rozsahu 3-8 %, hořčík je obsažen v množství 1-3 % a jestliže tyto slitiny také obsahují měď, tak maximálně do 2 %. Dosahují pevností až 600 MPa. Vývoj Al-Li slitin je motivován snahou o největší snížení hmotnosti u součástí letadel. Lithium umožňuje vytvrzování slitin s hliníkem. Binární slitiny Al-Li jsou velmi křehké, proto je v praxi často nelze použít. Plastickou deformací slitin za studena je možno dosáhnout velmi dobré kombinace tažnosti a pevnostních vlastností. [4]

## Slitiny hliníku pro odlitky

Společným prvkem slévárenských slitin hliníku je vyšší obsah určitých přísad. Proto mohou vznikat eutektické nebo nadeutektické slitiny. Velký výskyt intermetalických fází zhoršuje tvárnost těchto slitin. Slévárenské slitiny hliníku lze nejčastěji použít k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem a tlakově. Mechanické vlastnosti odlitků jsou nižší oproti tvářeným výrobkům. Dosahovaná mez pevnosti se pohybuje maximálně do 250 MPa. V dnešní době lze nejčastěji použít slitiny hliníku s křemíkem. Mezi méně používané se řadí slitiny soustavy hliník-měď a hliník-hořčík. Slitiny hliníku se zinkem jsou používány méně. [1, 3]

Výhody slévárenských slitin hliníku: [1]

- dobrá slévatelnost,
- krátký interval krystalizace,
- nízká teplota tavení,
- odolnost vůči korozi,
- malá náchylnost k tvorbě trhlin za tepla,
- minimalizace vodíku v odlitku.

## 1.2 Proces a produktivita obrábění hliníku

Vzhledem k tomu, že se neustále zvyšuje počet hliníkových součástí v leteckém, elektrotechnickém nebo automobilovém průmyslu, které se obrábějí pomocí třískového obrábění, je zájem o neustálé zvyšování produktivity i efektivity obrábění.

Při aplikaci Al geometrie, mikroleštěného povrchu a stabilního břitu s nízkou drsností se zlepšuje nejen výkon daného obrábění, ale může se stát ekonomickým přínosem v důsledku snižování výrobních nákladů, přičemž potřebné úspory jsou dosaženy snížením vlastního času obrábění. Vyplývá to z možnosti dosažení potřebné kvality obrobeného povrchu i při vyšších posuvech v porovnání s *VBD* ve standardním provedení s neleštěným povrchem. U standardní destičky s neleštěným povrchem je při stejném posuvu dosahována drsnost několikanásobně horší. [22]



Mezi přednosti destiček s geometrií pro obrábění hliníku patří: [22]

- speciální geometrie pro soustružení hliníku, slitin hliníku a dalších neželezných materiálů umožňuje tvorbu optimální třísky a dosažení vysoké přesnosti,
- pozitivní ostrý břit má za důsledek snížení sil řezání,
- leštěný povrch způsobuje redukci nalepování hliníku, snížení tvorby nárůstků a lepší jakost povrchu obrobku,
- submikronový substrát má velmi vysokou životnost a umožňuje vysokou stabilitu řezného procesu.

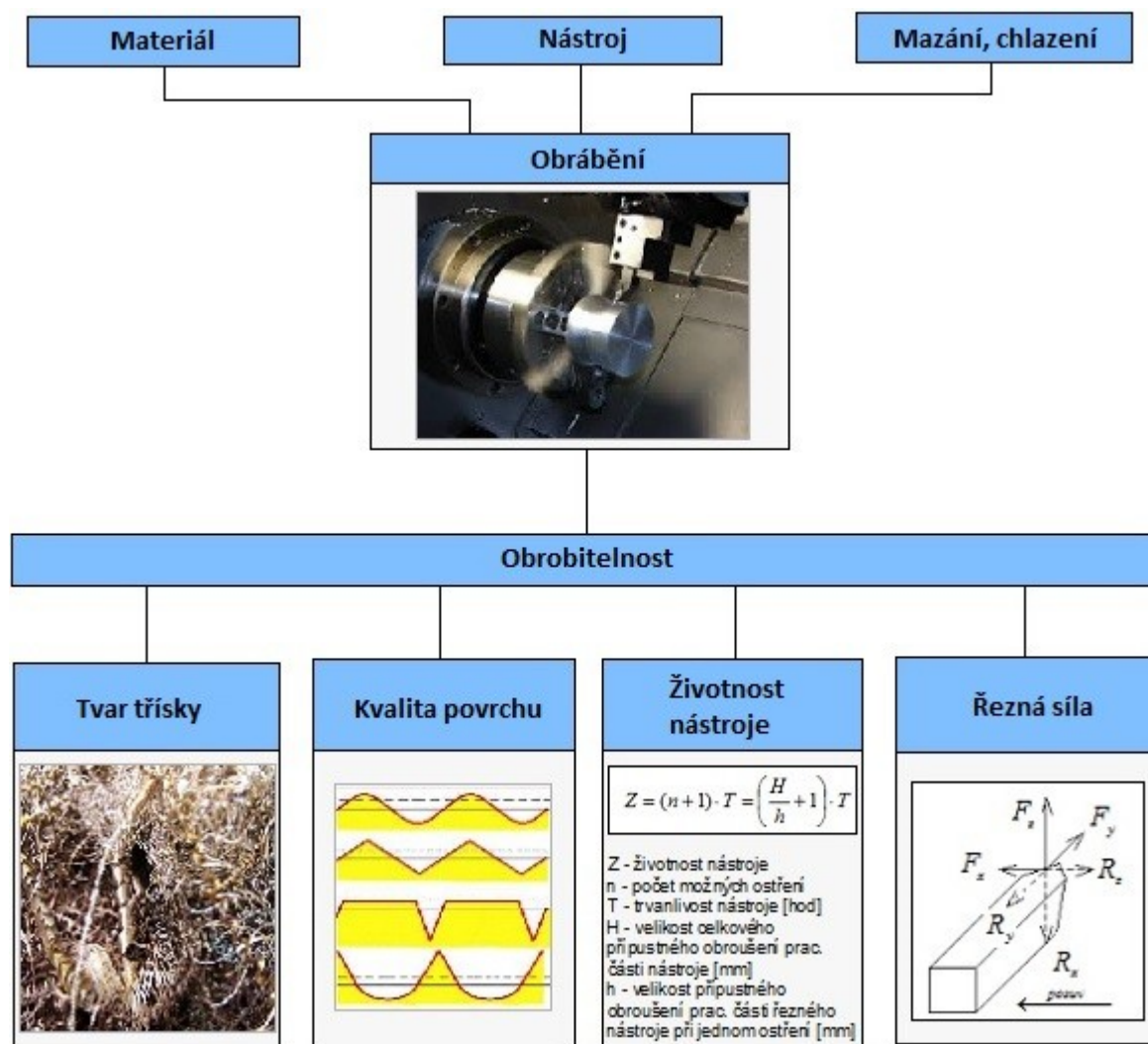
### 1.2.1 Obrobitelnost hliníku a jeho slitin

Pojmem obrobitelnost označuje souhrnný vliv fyzikálních vlastností, chemického složení kovů na průběh a na ekonomické, popř. kvalitativní výsledky procesu řezání. Lze ji obecně posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, energetické bilance procesu řezání a jejich vlivu na proces tvorby třísky a vytvoření nového povrchu na obrobku. [5]

Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a lze ji definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Je hlavním ukazatelem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech: [5]

- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie nástroje.

Pod pojem obrobitelnost lze zařadit řada parametrů a vlastností. Vedle požadavků na přesnost rozměrů obrobků je to životnost nástroje, síly řezání, kvalita povrchu a požadovaný tvar třísky pro daný způsob opracování. Schematicky jsou tyto parametry zobrazeny na obr. 1.3. Obrobitelnost nezávisí jen na mechanických a fyzikálních vlastnostech a stavu obráběného materiálu (tvrdost, houževnatost a struktura). Nejedná se o veličinu, kterou lze popsat určitým číslem, ale o technologický pojem, který zahrnuje vedle mechanických, fyzikálních a chemických vlastností obráběného materiálu i stav techniky používané při obrábění. [1]



Obr. 1.3 Parametry charakterizující obrobitelnost [1]

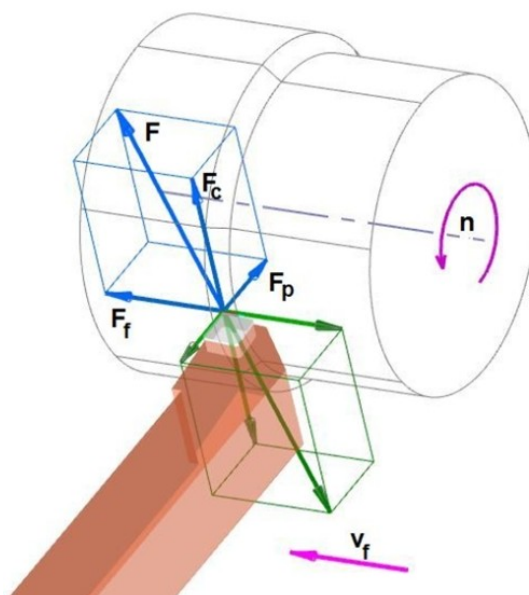
Obecně lze říci, že hliník a hliníkové slitiny patří ve srovnání s ostatními kovovými materiály mezi lépe obrobitelné. Jako příklad můžeme uvést, že ve srovnání s oceli mají stejné pevnosti jsou řezné síly u hliníkových slitin výrazně menší. Kdežto obrobitelnost čistého hliníku je velmi špatná, obrobitelnost hliníkových slitin je naopak velmi dobrá. Nejvýraznější rozdíl mezi obrobitelností čistého hliníku a hliníkových slitin lze najít ve struktuře materiálu. Daný vliv konstitučních fází, měkkých částic a stupně deformačního zpevnění může působit na obrobitelnost hliníku a hliníkových slitin velmi příznivě. [1]

### 1.2.2 Silové poměry a vznik třísky při obrábění

Obrábění kovů v dnešní době vyžaduje vynaložit poměrně značné síly na oddělení vrstvy materiálu ve formě třísky. Současné řezné nástroje jsou o poznání výkonnější než dříve zejména proto, že podrobné znalosti v oblasti řezných sil vedou ke koncentrovanému řezání, s ohledem na stabilitu břitu a pozitivní průběh obrábění. Geometrie břitů *VBD* jsou

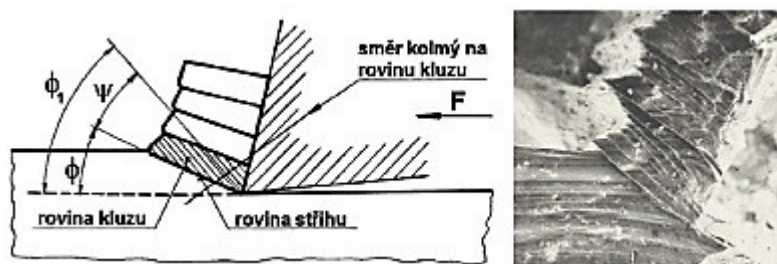
promyšlené do všech detailů a specializované na úzký okruh aplikací. Vznikající síly řezání jsou v přímém vztahu s energetickou náročností určité operace. Celková síla řezání se skládá z části ze sil, které vznikají při odřezávání třísky, a které třísku přetváří. Největší tlak může působit přímo na břit nástroje a s danou intenzitou se podél čelní plochy řezného nástroje zeslabuje. [6, 7]

Uvedené síly zatěžují celou kontaktní plochu mezi čelem a odcházející třískou. Optimalizace tvaru této plochy představuje klíč ke kontrole jak řezných sil, tak stability břitu a utváření třísky. Síla řezání dále ovlivňuje materiál břitu svým pohybujícím se sklonem ke změnám mikrogeometrie, a v oblasti menších řezných rychlostí použití procesních kapalin. Z prostorového hlediska můžeme výslednou sílu řezání  $F$  na tři složky:  $F_c$  – řezná síla,  $F_p$  – pasivní síla,  $F_f$  – posuvová síla. Axiální a radiální síly jsou tím menší, čím pozitivnější je geometrie aplikované VBD. [6, 7]



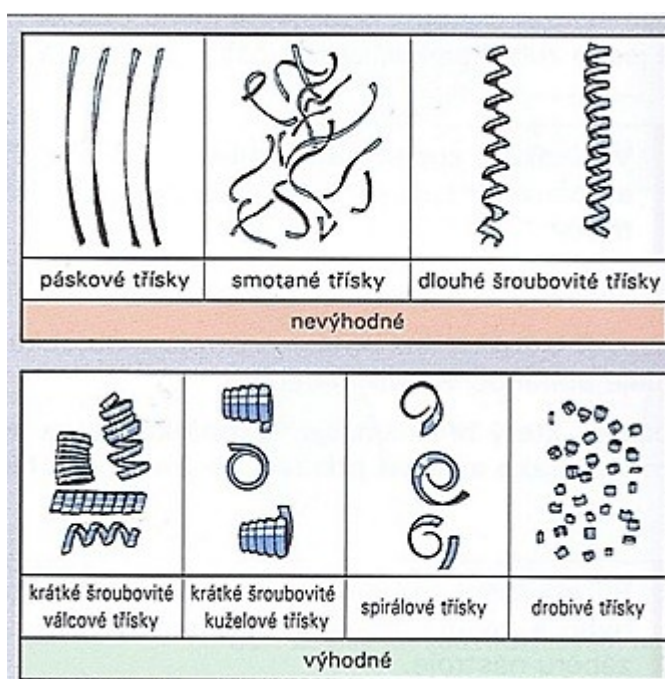
Obr. 1.4 Rozložení složek sil při soustružení [24]

Prioritním výstupem obrábění jsou parametry obrobenej plochy. Při řezání působí obráběcí nástroj na obrobek a snaží se vyvolat v materiálu napětí, proti kterému materiál klade odpor. V důsledku toho je ustáleno pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu teploty a deformace. Proces obrábění se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání. Smyková napětí rostou při obrábění do té doby, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje. Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dojde k přechování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělením třísky se v podstatě ukončen proces plastická deformace. Plastický lom nastane působením kluzné síly, kdežto křehký lom působením síly normálové. [5]



Obr. 1.5 Vznik třísky [5]

Jedním z klíčových parametrů při hodnocení obrobitelnosti je tvar třísky. Pro toto hodnocení na základě tvaru třísky lze použít vizuálního hodnocení, kdy jsou dané třísky rozděleny podle tvaru do určitých skupin. [1]



Obr. 1.6 Typické tvary třísek [25]

Drobivá tříška může vznikat při obrábění velmi křehkých materiálů nebo při maximální hloubce řezu, nízké řezné rychlosti a poměrně malých úhlech čela. Vlivem vytrhávání materiálu z obrobku může vznikat drsný povrch obráběné plochy. Článekovitá tříška vzniká u houževnatějších materiálů, jako je např. ocel střední pevnosti nebo při středních úhlech čela a velmi nízkých řezných rychlostech. Tyto třísky mohou tvořit poměrně krátké šroubovice. Plynulá tříška může vznikat u houževnatých materiálů, u vysoké řezné rychlosti při velkých úhlech čela. U dané kvality obrobku je tato tříška nejvhodnější. Ale z hlediska obsluhy (namotávání na obrobek, vznik úrazu, nesnadné odstraňování třísky) jsou nejméně vhodné. Z tohoto důvodu je vhodné třísku lámat. K tomu slouží tzv. lamače třísek a utvářeče třísek. [25]

Při obrábění slitin, které jsou legovány křemíkem, se tvoří většinou krátká a dobře lámavá tříska. Výjimku však mohou představovat eutektické slitiny, u kterých se tvoří dlouhé svinuté třísky. U opotřebovaných nástrojů se mohou tvořit dlouhé smotané třísky, které lze velmi obtížně od nástroje odstranit. Drsnost povrchu u eutektických a podeutektických Al-Si slitin klesá s rostoucí řeznou rychlostí. Při poměrně vysoké řezné rychlosti je kvalita povrchu neustále zhoršována. [1]

### 1.2.3 Geometrie a řezné nástroje

Materiál destiček musí zachovávat velmi dobrou houževnatost při dostatečné otěruvzdornosti a vysoké stabilitě řezného procesu. Díky vynikající pevnosti břitů je možno realizovat konstrukční řešení břitových destiček s velmi pozitivní geometrií. [22]

Vyměnitelné břitové destičky pro soustružení hliníku, hliníkových slitin i dalších neželezných materiálů mají speciální geometrii s vysokou přesností a optimalizovanou konstrukci utvářeče třísky, který zajišťuje taktéž dobrý odvod třísky již od hloubek řezu  $a_p = 0,5$  mm až do  $a_p = 7$  mm a posuvů od velikosti  $f = 0,06$  mm. Pozitivní ostrý břit s vysokou stabilitou a nízkou drsností může způsobit určité snížení sil řezání a zajišťuje velmi vysokou kvalitu obrobeneho povrchu. [22]



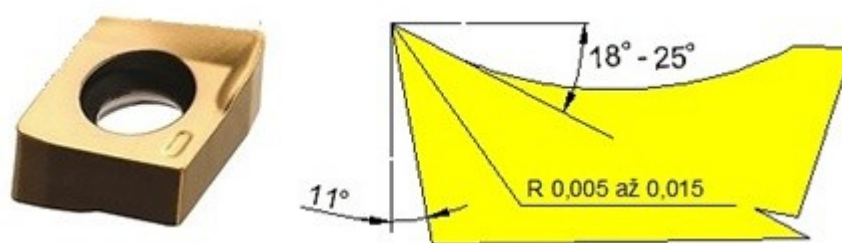
Obr. 1.7 Vyměnitelné břitové destičky pro obrábění hliníku [26]

Pro racionální obrábění hliníku, jeho slitin a neželezných kovů všeobecně je vždy třeba vytvořit určité optimální pracovní podmínky hlavně z hlediska použitého řezného materiálu, obráběcích nástrojů a jejich geometrie břitů. Základním a asi nejdůležitějším předpokladem k dosažení úspěšných výsledků při obrábění hliníku a dalších neželezných kovů je nesporně nutnost použití vhodných řezných materiálů pro výrobu obráběcích nástrojů. K tomu účelu použité vyměnitelné břitové destičky ze SK musejí proto vykazovat výbornou odolnost proti rychlému opotřebování břitů otěrem i při velmi velkých řezných rychlostech. [27]

Vyráběné *VBD* se vyznačují velmi ostrým břitem s pozitivní geometrií břitů s úhlem čela  $\gamma = 20$  až  $30^\circ$ . Destičky ve většině případů mohou mít mikroleštěný povrch a kvalitní provedení ostří, což zmenšuje daný koeficient tření a adhezi k hliníku. Proto je omezena možnost "nalepování" obráběného materiálu na nástroj, což je velmi důležité z hlediska obrábění. [27]

U tohoto provedení a použité geometrie břitů vyměnitelných břitových destiček vznikají velmi malé řezné odpory, z toho vyplývá, že se dosahuje optimálních pracovních výsledků i při obrábění méně tuhých nebo tenkostěnných obrobků. Speciální utvářeče třísek umožňují vznik krátkých šroubovitých tvořících třísek a jejich spolehlivý a v neposlední řadě plynulý odchod z oblasti řezu. [27]

Obecně platí, že pro obrábění hliníku a jeho slitin je potřeba nástroj s ostrým pozitivním břitem. Při obrábění slitin hliníku taktéž vzniká problém s odvodem třísek, proto musí geometrie břitu splňovat určité požadavky na odvod třísek. Často se tvoří dlouhá spojitá tříska, proto je nutné, aby měl řezný nástroj vždy utvářeč třísky. Pro obrábění slitin hliníku jsou určeny nástroje s vysoce pozitivním břitem. U procesu obrábění není třeba velkých řezných sil, proto jsou vhodné vyměnitelné břitové destičky s pozitivní geometrií břitu, s malým úhlem a poloměrem špičky. [8, 22]



Obr. 1.8 Geometrie nástroje pro obrábění Al-slitiny [8]

#### 1.2.4 Řezné podmínky soustružení hliníku a jeho slitin

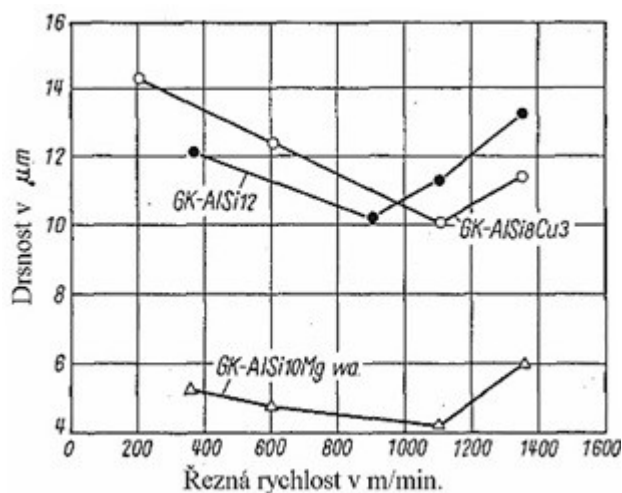
Řeznými podmínkami se při obrábění rozumí řezná rychlost, posuv a hloubka záběru. Volbou řezných podmínek je možno ovlivňovat určitý výkon obrábění, tj. množství materiálu, které bylo odebraného za časovou jednotku, velikost řezných sil, trvanlivost ostří, příkon stroje, jakost obrobené plochy a mnoho dalších parametrů. [28]

Při vypracování výrobního postupu je snahou určit vhodné řezné podmínky pro daný způsob obrábění. Vhodnými řeznými podmínkami se rozumí takové, při kterých byly dosaženy nejnižší výrobní náklady při nejkratším možném výrobním čase. [28]



Volbu řezných podmínek ovlivňuje zejména: [28]

- materiál výrobku a nástroje,
- geometrie břitu,
- výrobní stroj,
- požadavky na přesnost a drsnost obrobeneho povrchu.



Obr. 1.9 Závislost kvality povrchu na řezné rychlosti pro slévarenské slitiny Al-Si [1]

Při samotném určování řezných podmínek je třeba respektovat hledisko požadované přesnosti přiblížení se k podmínkám optimálním a hledisko nákladů vynaložených na tuto činnost. Je přinejmenším zřejmé, že uvedená hlediska působí proti sobě: větší přesnost určení znamená vyšší náklady a naopak. Čím vyšší bude počet součástí vyrobených za stejných řezných podmínek, tím více se vyplatí náklady spojené s náročnějším způsobem zjištění optimálních podmínek. Podle přesnosti a náročnosti je možno uvést základní způsoby určování řezných podmínek v pořadí: zkusmo, podle tabulek a nomogramů, podle normativů a v neposlední řadě také výpočtem. [28]

Tab. 1.3 Srovnání doporučených řezných podmínek soustružnických nožů [29]

Obráběný materiál [kp.mm <sup>-2</sup> ]	Nástrojový materiál			
	Rychlořezná ocel		Slinutý karbid	
	Hrubování	Dokončování	Hrubování	Dokončování
Hliník, slitiny Al	$v_c = 100 - 200$ $f = \text{do } 2$	$v_c = 100 - 200$ $f = \text{do } 0,2$	$v_c = 100 - 1000$ $f = \text{do } 2$	$v_c = 150 - 1000$ $f = \text{do } 0,2$

Pozn. Informativní hodnoty řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] a posuvu  $f$  [ $mm$ ] při řezání.

Vliv řezného prostředí na proces obrábění je v dnešní době zcela komplexní. Dva základní účinky řezného prostředí - chladicí a mazací efekt má výrazně zásadní význam. Významnou úlohu při obrábění hraje zmiňované řezné prostředí. Přirozeným řezným prostředím je vzduch, dnes se však většina obráběcích technologií odehrává za přítomnosti procesních kapalin. Ty jsou obvykle aplikovány přímo proudem kapaliny, někdy též ve formě mlhy. V případě třískového obrábění ovlivňují procesní kapaliny zejména mechaniku tvoření třísky, silové jevy a třecí práci na stykových plochách mezi obrobkem a nástrojem, topografii a zpevnění obrobeného povrchu. Důležitá je i čistící funkce pro odstraňování třísky, případně opotřebovaných brusných zrn z místa řezu. Dobrá procesní kapalina musí dále vykazovat antikorozní vlastnosti, nesmí však vyvolávat barevné změny na povrchu kovu. Nezanedbatelným a ne zcela důležitým požadavkem je snadná odstranitelnost kapaliny z povrchu kovu. [30]

Nejvýkonnější procesní kapaliny jsou dnes produkovány téměř výhradně ve formě tzv. mikroemulzí, které jsou vysoce homogenní, někdy téměř průzračné. Vyznačují se sníženým obsahem minerálního oleje, což je může činit ekologicky šetrnějšími. Podstatnou součástí chemického složení těchto mikroemulzí tvoří speciální přidaná aditiva. Z tohoto důvodu jsou tyto kapaliny někdy označovány jako polosyntetické. Aditivací je možné dosáhnout výjimečné životnosti, extrémních výkonů a příznivých ekologických a hygienických vlastností. [30]

Současný vývoj v oblasti procesních kapalin klade výrazný důraz na oblast již zmiňovaných mikroemulzí pro obrábění hliníku. Tato skutečnost odráží velkou důležitost hliníkových slitin v dnešním moderním průmyslu. Hliníkové slitiny se vyznačují velkou řadou příznivých vlastností, především nízkou hmotností při vysoké pevnosti. Aby toho nebylo málo, obrábění hliníku přináší řadu určitých problémů, z nichž mnoho může vyřešit výběr vhodné procesní kapaliny. [31]

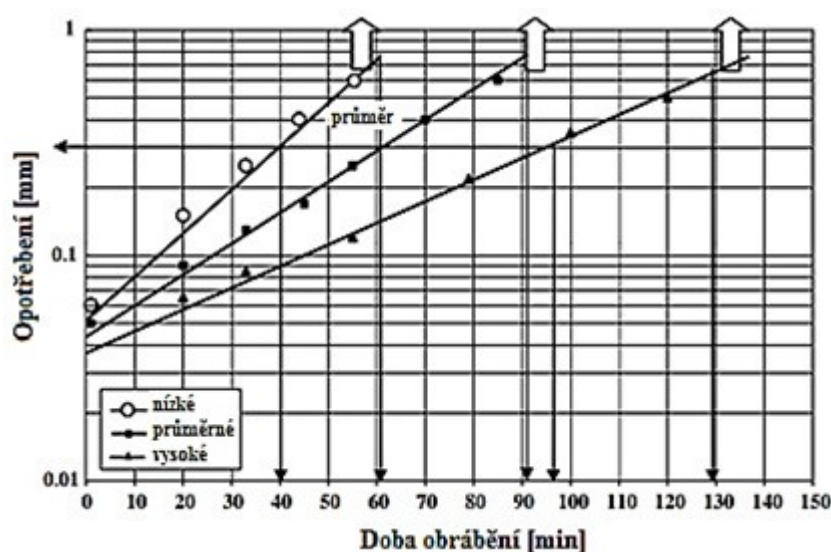
Obrábění hliníku a hliníkových slitin obecně přináší tři hlavní nedostatky typické pro tento typ materiálu. První z nich má příčiny v mechanických vlastnostech hliníku, který tvoří velmi měkký a zároveň přilnavý kov. Při obrábění má hliníkový materiál tendenci k zalepování řezného nástroje, což vede k velkému nebezpečí tvorby nárůstků na břitě nástroje. Pokud je tento problém přinejmenším zásadní, má výrazný vliv na výkon obrábění. Nárůstek v řadě případů mění geometrii řezného nástroje. Výsledkem je pak snížená kvalita obrobeného povrchu. [31]



Druhým zmiňovaným nedostatkem jsou nežádoucí chemické interakce hliníkových slitin s okolním prostředím, které je tvořeno hlavně procesní kapalinou. Tyto chemické interakce vedou k tvoření různě zbarvených, tmavých, někdy až černých skvrn. Třetím nedostatkem, který je nutno řešit, je potenciál k biologické aktivitě. Hliník je odjakživa měkký, proto za určitých podmínek dobře obrobitelný materiál. Každá formulace kapaliny určená pro obrábění hliníku a hliníkových slitin musí být obohacena o dostatečně účinný biocid, který působí proti nežádoucí biologické aktivitě. [31]

### 1.3 Opotřebení a trvanlivost nástroje

Trvanlivost nástroje je definována jako doba řezání pro dosažení předem stanoveného opotřebení, tzv. kritérium opotřebení nástroje. Velikost tohoto kritéria je závislá na použité třídě, obvykle tvrdší stupeň může být použit při větším opotřebení hřbetu. Pro dokončovací operace, kde jsou vyžadovány úzké tolerance, je kritérium opotřebení relativně malé. Nejvhodnější kritérium opotřebení závisí na geometrii břitu a materiálu. Trvanlivost nástroje je určena na základě posouzení doby, za kterou je dáno předem stanovené opotřebení hřbetu (0,25 – 0,4 – 0,6 – 0,8 mm). Obr. 1.10 znázorňuje, jak se opotřebení hřbetu mění v závislosti na čase obrábění pro tři různé kombinace řezné rychlosti a posuvy. Alternativně tyto křivky mohou představovat určité varianty obrobitelnosti s dopadem na trvanlivost nástroje, když jsou řezné rychlosti a posuvy konstantní. Všechny křivky opotřebení nástroje se dříve nebo později náhle vyobrazí směrem nahoru a břit se zlomí, tj. kritické selhání, jak je naznačeno bílými šipkami na obr. 1.10. [16]



Obr. 1.10 Závislost opotřebení hřbetu na čase obrábění [16]

Trvanlivost nástroje, stejně jako opotřebení nástroje, závisí především na způsobu obrábění, vlastnostech obrobeneho a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí). Pan F. W. Taylor zjistil, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv především řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, který je nejčastěji znám pod názvem "T- $v_c$  závislost" (někdy také "Taylorův vztah") a užívá se ve tvaru: [5]

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} \text{ [min]}, \quad (1.1)$$

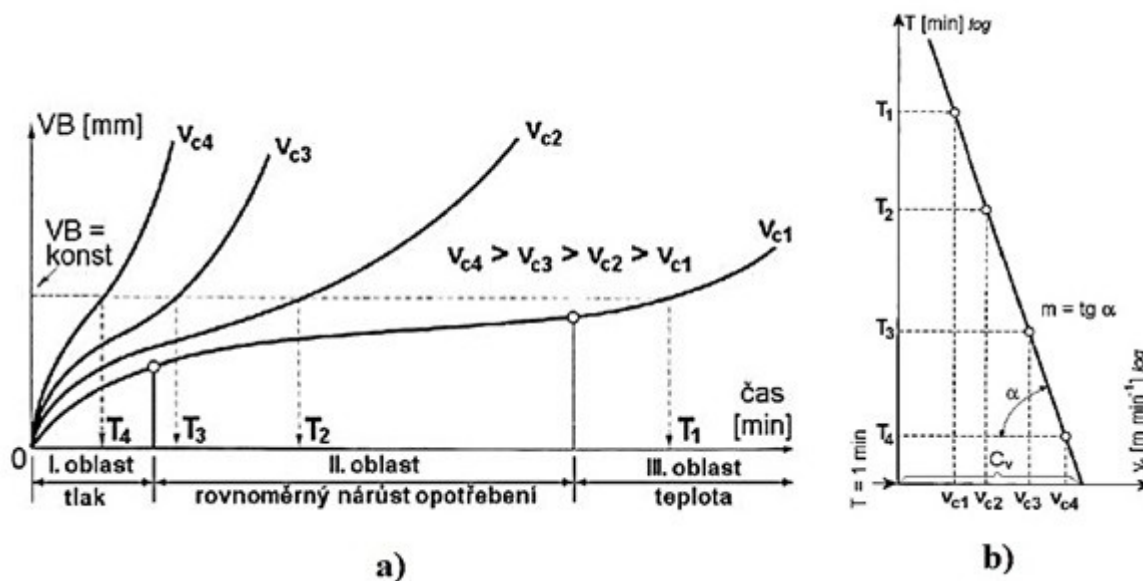
$c_T$  [-] - konstanta,  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] - řezná rychlost,  $m$  [-] – exponent (dle vlastností řezného nástroje)

nebo vzhledem k vysoké a příliš nepraktické hodnotě konstanty  $c_T$  nejčastěji ve tvaru:

$$v_c = \frac{c_V}{T^{1/m}} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (1.2)$$

$c_V$  [-] – konstanta (je řádová velikost konstanty  $c_V$  pouze  $10^2 \div 10^3$ ).

Postup při stanovení základní T- $v_c$  závislosti pro určitou kombinaci řezný nástroj - obráběný materiál vychází zásadně z definice trvanlivosti. Za ostatních konstantních řezných podmínek je daný materiál obroben daným nástrojem minimálně při čtyřech různých řezných rychlostech, kdy se sleduje časový nárůst opotřebení nástroje. [5]



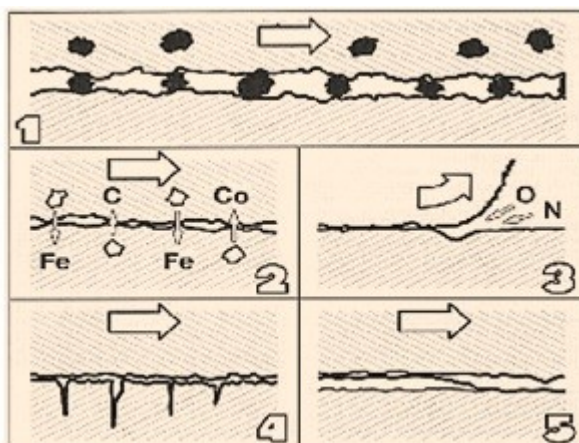
Obr. 1.11 a) Závislost opotřebení na čase při určitých řezných rychlostech, b) zlogaritmovaný diagram  $T - v_c$  [5]

Řezivost určitého nástroje lze charakterizovat jako vlastnost, která umožňuje efektivním způsobem odebírat třísku z materiálu. Úzce souvisí s mechanickými a fyzikálními vlastnostmi řezného materiálu nástroje a mnoha dalšími faktory, jako je metoda obrábění, řezné podmínky atd. Řezivost není vlastností absolutní a to ve smyslu, že závisí taktéž i na obráběném materiálu (mechanických vlastnostech). Nejčastějším kritériem pro hodnocení řezivosti nástroje je  $T-v_c$  závislost. Při obecném pohledu má lepší řezivost právě ten nástrojový materiál, který vykazuje vyšší hodnotu konstanty  $c_v$  a nižší hodnotu exponentu  $m$ . Hodnoty exponentu  $m$ : nástrojové oceli - 10 až 8; rychlořezné oceli - 8 až 5; slinutý karbid - 5 až 2,5; řezná keramika - 2,5 až 1,5. [9]

Při procesu obrábění vzniká velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše čela a hřbetu řezného nástroje. Tepelná zatížení poměrně namáhají materiál břitu nástroje a v určitých případech obrábění vytváří dynamický faktor. Procesem utváření třísky, přičemž se generuje poměrně vysoký tlak a teplota, se průběžně vytváří čistý kovový povrch, při kterém má daný obráběný materiál sklon k určitým chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice však přinejmenším dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dochází k abrazivnímu efektu. Kombinací mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů (obr. 1.12) dochází ke komplikovanému zatěžování břitu. Důsledkem toho je opotřebení nástroje. [5]

Mezi základní mechanismy opotřebení patří zejména: [5]

- Abrazie (1), kdy se jedná o brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje.
- Adheze (5) je vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholech nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů.
- Difúze (2), zde se jedná o migraci atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje.
- Oxidace (3) je vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.
- Plastická deformace, důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase.
- Křehký lom (4), jedná se o důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez.



Obr. 1.12 Hlavní mechanismy opotřebení břitů řezných nástrojů [5]

### 1.3.1 Opotřebení na hřbetu nástroje

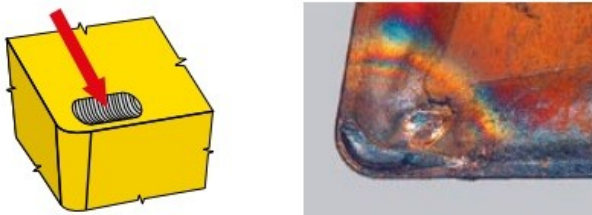
Opotřebení na hřbetu nástroje patří mezi tzv. abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitu. Opotřebení hřbetu lze zařadit mezi všeobecně obvyklé typy opotřebení. Příliš velké opotřebení hřbetu má však za následek zhoršení jakosti obráběného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břitu. Otěr hřbetu je jedním z hlavních kritérií, které charakterizují trvanlivost *VBD*. Jeho velikost neboli intenzitu lze ovšem pouze snížit. Jako opatření proti vzniku je používán otěruvzdornější typ *SK*, lze snížit řeznou rychlost, zvýšit posuv, zvýšit intenzitu chlazení. [5, 10]



Obr. 1.13 Opotřebení hřbetu *VBD* [10]

### 1.3.2 Opotřebení ve tvaru žlábků

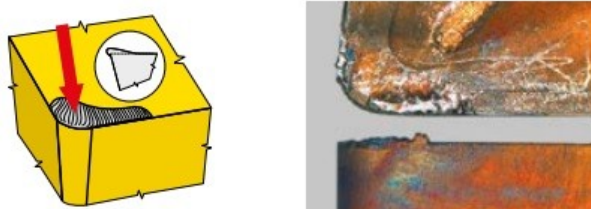
Opotřebení ve tvaru žlábků na čele je dopadem působení mechanismů difúzního opotřebení a také abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem řezného materiálu nástroje vyvolaného brousicím pochodem. Vznik je v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitu. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábků může ovšem změnit geometrii břitu. Opotřebení se nejvýrazněji projevuje u *VBD* s rovným čelem. Při obrábění měkkých obrobitelných materiálů vzniká žlábek širší a mělčí, u tvrdých materiálů naopak žlábek úzký a hluboký. Destrukci lze zabránit snížením řezné rychlosti, použitím jiného typu řezné geometrie *VBD* nebo chladicí emulzí. [5, 10]



Obr. 1.14 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele VBD [10]

### 1.3.3 Tvorba nárůstku na hřbetě nástroje

Tvorba nárůstku je v mnoha případech neobyčejným jevem, vztahující se k teplotám a řezným rychlostem. Nadměrná tvorba nárůstků může vést až k lomu, v horším případě destrukci VBD. Jako opatření můžeme použít změnu (zvýšení) řezné rychlosti, změnit (zvýšit) posuv, aplikovat povlakované typy SK, použít odlišnou řeznou geometrii, použít chladicí emulze s vyšším protinárůstkovým účinkem. [5, 10]



Obr. 1.15 Nárůstek na čele VBD[10]

### 1.3.4 Plastická deformace špičky

Plastická deformace břitu může vznikat působením kombinace velmi vysokých teplot a řezných tlaků na břit. U řezného materiálu nástroje, který těmto zatížením odolává, ale plasticky se nedeformuje, je tvrdost za tepla rozhodujícím okolností. Deformaci lze zabránit použitím otěruvzdornějších typů SK, snížením řezných podmínek, použitím chladicí emulze nebo použitím VBD s větším poloměrem zaoblení špičky nebo úhlem špičky. [5, 10]

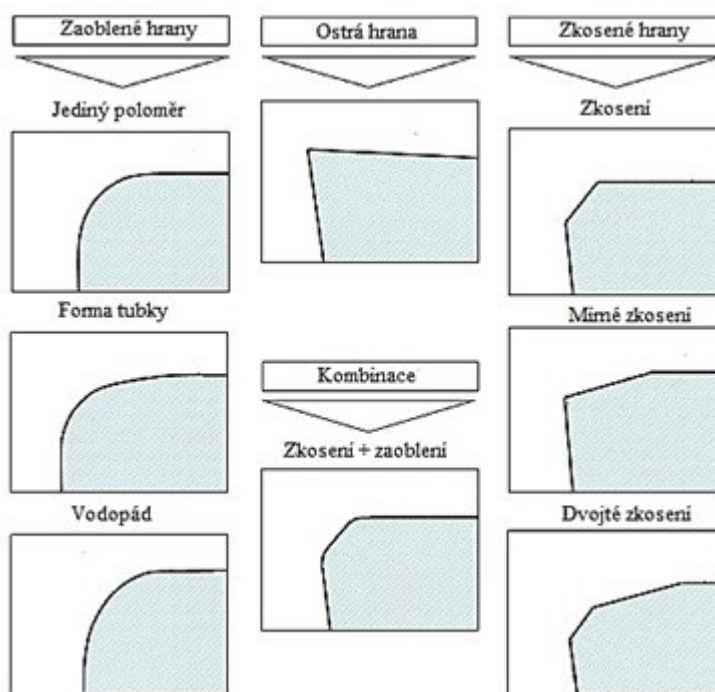


Obr. 1.16 Plastická deformace špičky VBD [10]

## 2. TECHNOLOGIE ZAOBLENÍ BŘITU

Při určení formy břitu poskytují nástrojoví návrháři a výrobci různé možnosti geometrie zaoblení ostří, které jsou obvykle označovány za přípravu břitu. Obr. 2.1 ilustruje hlavní typy přípravy konstrukce, které jsou používány u většiny komerčních přesností řezných nástrojů. Obecně existují tři typy: ostré břity, zaoblené ostří a zkosené ostří (kombinace mezi sraženou a zaoblenými hranami). [17]

Běžnou aplikaci zaoblených ostří bývá dokončování, polo-dokončovací obrábění, přesné obrábění a mikroobrábění. Naproti tomu, zkosené ostří jsou často používány u tvrdého soustružení, těžkého obrábění nahrubo a přerušovaného obrábění. Zkosené břity jsou běžně používány na kubický nitrid boru, u polykrystalického kubického nitridu boru a keramických nástrojů. Zaoblené ostří jsou obvykle aplikovány na diamant, polykrystalický diamant, rychlořezné oceli a u slinutých karbidů. [17]

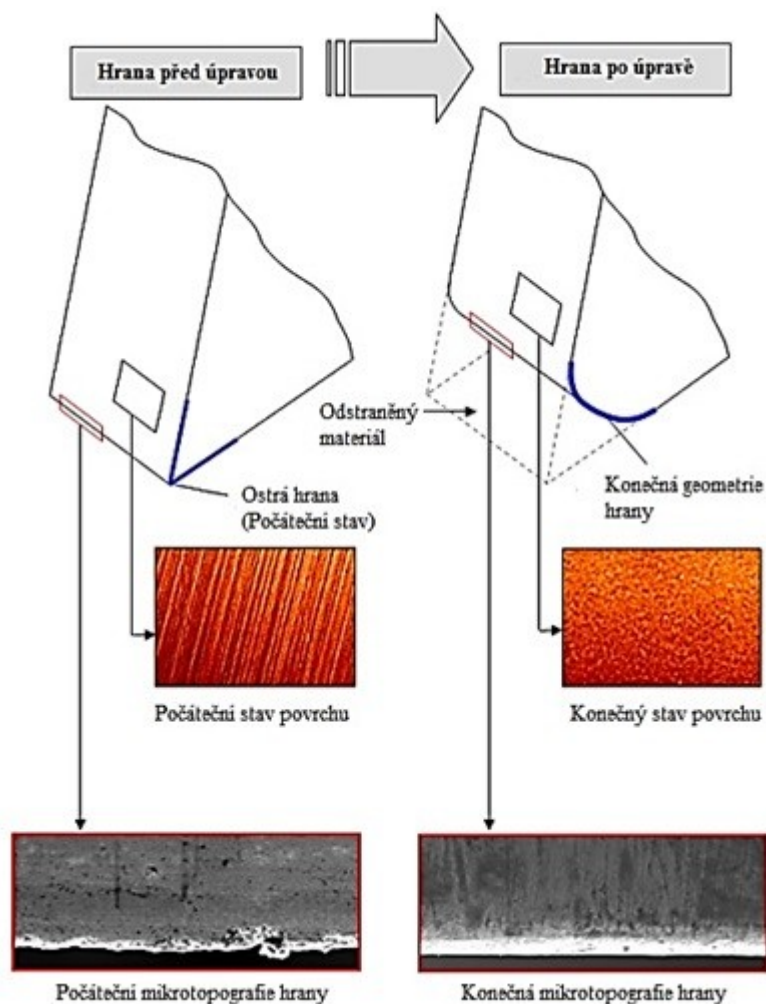


Obr. 2.1 Typické druhy zkosení a zaoblení ostří [17]

Příprava břitu spočívá ve vytváření geometrie břitu a úpravy mikrotopografie ostří, jakož i změnu v drsnosti a textury povrchů nástrojů v blízkosti ostří, přičemž jsou eliminovány vady ostří a zlepšuje se pevnost, tímto se zlepší výkonnost a spolehlivost řezného nástroje a kvalita obráběného povrchu. Řezná geometrie břitu má velký vliv na danou výkonnost a přesnost nástroje. Tento aspekt má zvláště velký význam pro řezné nástroje určené pro hromadnou výrobu. Způsob přípravy ostří vyžaduje na jedné straně



přilnavost nátěru a na druhé straně posílení ostří, aby se zabránilo nepředvídatelnému odlupování. Defekty ostří jsou přítomny téměř u všech nástrojů před přípravou břitu (otřepy, špatná drsnost povrchu, atd.). Proto tyto vady musí být odstraněny, aby bylo dosaženo optimálního výkonu. [17]



Obr. 2.2 Typické druhy zkosení a zaoblení ostří [17]

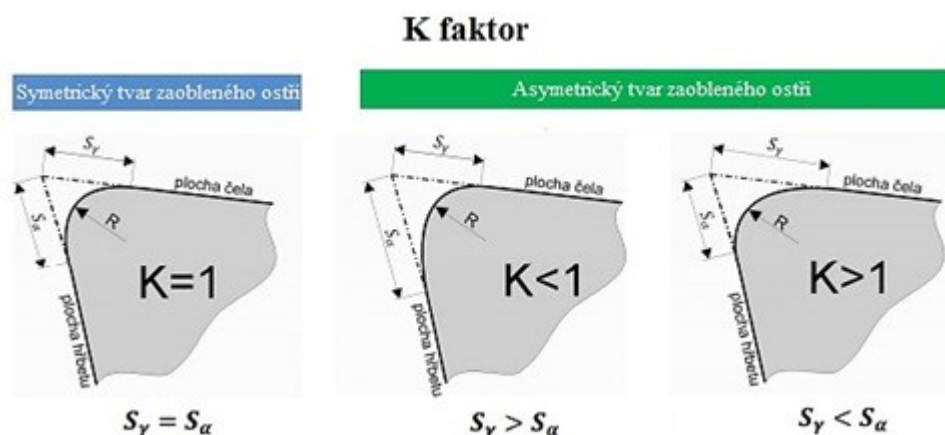
Obecně lze říci, že symetrii profilu ostří vyjadřuje  $K$  faktor, který je bezrozměrný. Je vyjádřen velikostí zaoblení na čele na hřbetu břitu pomocí hodnot  $S_y$  a  $S_a$ . Na proces obrábění má vliv velikost a tvar zaoblení břitu. Všechny vlivy byly podrobeny zkoumání pomocí výpočetních simulací. Následně bylo zjištěno, že  $K$  faktor je závislý na určitých vlastnostech substrátu nástroje (přerušovaný nebo nepřerušovaný řez) a na typu nástroje. Následně má  $K$  faktor také vliv na silové a teplotní zatížení nástroje. Když  $K = 1$ , tak nejvyššího teplotního zatížení bylo dosaženo na čele nástroje a silovým zatížením je nejvíce namáháno pásmo na čele nástroje u špičky, tedy dochází k intenzivnějšímu opotřebení čela. [18]

$K$  faktor vypočteme dle vztahu: [18]

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} [-], \quad (2.1)$$

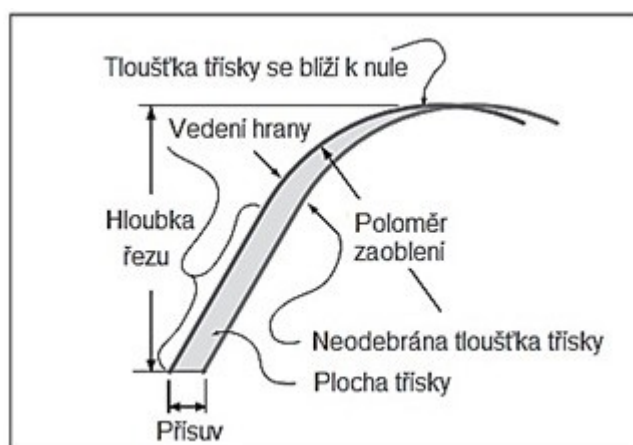
Symetrický rádius ostří je dán střední velikostí zaoblení břitu řezného nástroje - aritmetický průměr hodnot  $S_\gamma$  a  $S_\alpha$ : [18]

$$\bar{S} = \frac{(S_\gamma + S_\alpha)}{2} [\mu\text{m}], \quad (2.2)$$



Obr. 2.3 Základní tvary zaoblení ostří [18]

Neodebrána tloušťka třísky je primárně řízena posuvem. Nicméně, poloměr hrotu, použitý v mnoha procesech, rovněž ovlivňuje neodebranou tloušťku třísky (obr 2.4). Pro tuto geometrii břitu se tloušťka třísky snižuje podél poloměru rohu a v konečném důsledku se blíží k nule, tedy blízko špičky nástroje. Poloměr špičky, a to zejména v blízkosti hrotu nástroje, se podrobuje snížení řezné účinnosti. Zvětšením poloměru zaoblení lze snižovat tloušťka třísky, takže obrábění materiálu blízko špičky nástroje je méně efektivní. [19]

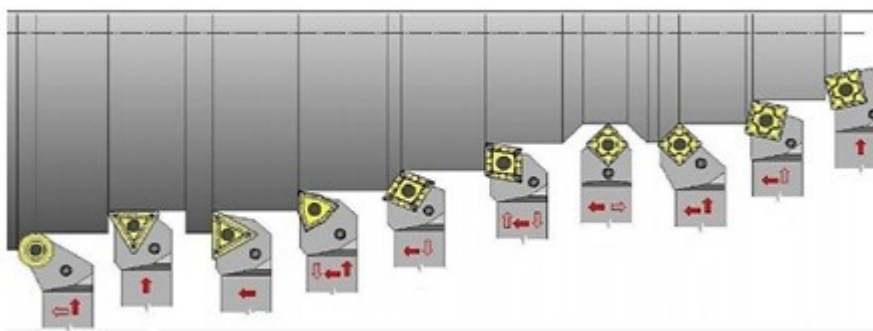


Obr. 2.4 Zaoblení břitu [19]



## 2.1 Tvar a velikost VBD

Tvar *VBD* je vždy stejný s úhlem nastavení hlavního ostří, přístupností, mnohostranností použitelnosti daného soustružnického nože. Z důvodu hospodárnosti a stability se rovněž musí rozhodnout pro takovou *VBD*, která má větší úhel špičky, ale je dbáno na pravidlo: univerzálnost před stabilitou, se naopak doporučuje používat při obrábění za měnících se řezných podmínek, menší úhel špičky. Velikost vyměnitelné břitové destičky souvisí s držákem, který byl pro proces obrábění zvolen. Při volbě velikosti *VBD* je nutné zohlednit dvě vzájemně si odporující okolnosti: spolehlivost obrábění a náklady celého procesu. Větší *VBD* jsou podstatně dražší, mohou však zaručit větší spolehlivost břitu. Toto hledisko převládne zvláště u náročných hrubovacích operací, nebo při obrábění s přerušovaným řezem. Při volbě velikosti *VBD* se vezme v úvahu také největší hloubka řezu, která má být obráběna. Musí být stanovena aktivní délka ostří. [32]



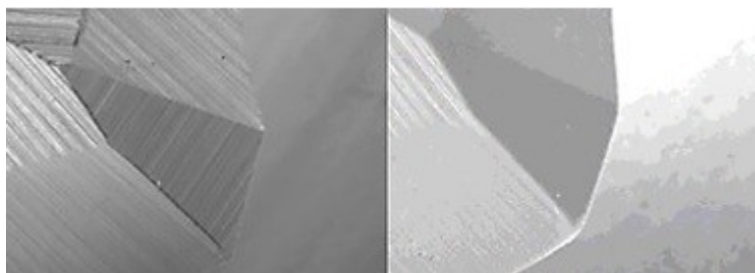
Obr. 2.5 Tvary *VBD* [11]

## 2.2 Hodnocení kvalitativních parametrů nástroje

Pod pojmem jakost povrchu je možné si představit souhrn všech geometrických, fyzikálních a chemických vlastností skutečného povrchu posuzované plochy, tj. povrchu, kterou odděluje těleso od okolního prostředí. Na tomto principu závisí mnohé funkční vlastnosti strojů, životnost, pevnost jednotlivých součástí, vzhled a výrobní náklady. Mezi další parametry, které je zde možno zařadit patří hlučnost, přestup tepla, ztráty třením, elektrická vodivost, doba záběhu, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi a mnoho dalších. [33]

Pod pojmem mikrogeometrie řezného nástroje si lze představit především jednotky vyskytující se na břitu nástroje, které se pohybují v řádech mikrometrů. Jedná se zejména o zakřivenost povrchu břitu vlivem drsnosti po broušení. Mikrogeometrie nástroje je do jisté míry ovlivněna použitým řezným materiálem, ve smyslu, jak dobře lze daný materiál vybrousit k tzv. dokonalé ostrosti, tak i nanesenou otěruvzdornou vrstvou, která výborně

opisuje povrch nástroje a ovlivňuje výslednou drsnost povrchu. Při depozici tenkých vrstev na ostrý břit může docházet k jejímu odlupování neboli destrukci vlivem velkého napětí soustředěného na malou plochu. Nečekaný problém ostrého hrany může nastat i na samotném ostří nástroje z SK, kde mohou vznikat velmi ostré břity po broušení vlivem vytrhání tvrdých karbidů z daného pojiva. [33]

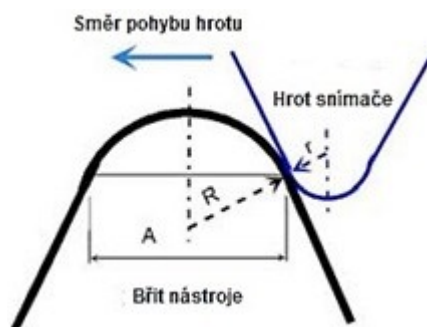


*Obr. 2.6 Stav před a po úpravě břitu [33]*

Vlastní zaoblení ostří je v největší míře závislé na použité technologii, jeho velikost a tvar závisí na používaném médiu. Z hlediska řezného procesu je velice důležité umět ho popsat a změřit, tak aby obráběcí proces splňoval základní podmínky záběru. Mezi základní postupy, kterými lze měřit zaoblení a drsnost povrchu, lze zařadit dotykové a bezdotykové metody. [33]

### 2.2.1 Dotykové metody

Mezi dotykové metody, které většina výrobců používá, lze zařadit například měření pomocí profilometru. Někteří zákazníci uvádějí, že používají specifické raménko s diamantovým hrotem o vrcholovém úhlu  $60^\circ$ , které je posouváno po povrchu přes ostří nástroje. Určitou podmínkou při snímání profilu zaoblení ostří je dodržení souměrnosti snímaného profilu ostří (obr. 2.7). Drsnost povrchu zde nemůžeme změřit, což lze zařadit mezi velkou nevýhodu této metody. [33]



*Obr. 2.7 Měření zaoblení ostří pomocí profilometru [33]*

Mezi další metody, které umožňují měření špatně přístupných ploch, jsou laboratorní drsnoměry. Proto je výrobci dodávají s řadou vyměnitelných snímacích ramének. Největší důraz se klade na citlivost snímání drobných nerovností, a jestli je lineární snímání příčných pohybů. Snímací hrot má proto menší vrcholový úhel a malý poloměr zaoblení. Při samotném měření je použit stativ. Příčné pohyby snímacího hrotu lze snímat tzv. Hallovými sondami. Drsnoměr je připojitelný na počítač pro potřebnou evidenci výsledků. Nejvýznamnější výhodou těchto systému je, že mohou umožnit měření obou parametrů, tedy zaoblení a drsnost povrchu v požadovaných místech. [33]



*Obr. 2.8 Drsnoměr MarSurf XC2 MarWin [33]*

### 2.2.2 Bezdotykové metody

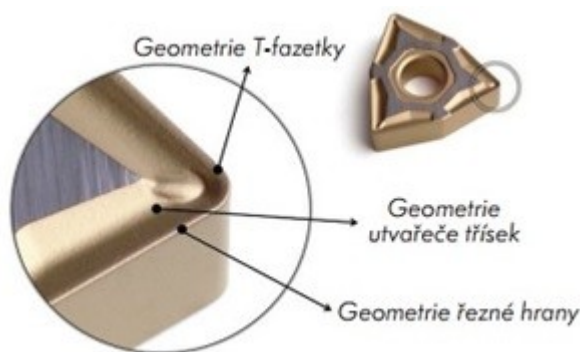
U této metody je možné si uvést několik možností. První možností je např. měření konfokálním laserovým mikroskopem Olympus LEXT OLS 3000 (obr. 2.9). Mikroskop umožňuje 3D sledování dané drsnosti povrchu a celkového tvaru i vysoce přesné 3D měření v reálném čase. Díky tomuto jde o velmi spolehlivé měření profilu jemných povrchů. Je zde velmi rychlé a snadné ovládání a možnost opakovatelnosti. Další možností bezdotykové metody je systém EdgeMaster, který je určen přímo pro měření výše zmíněných parametrů na daném nástroji. Mezi výhody lze řadit jeho jednoduchost a neobyčejnou rychlost vyhodnocování získaných výsledků. Zde je však velkou nevýhodou, že se musí měřit každý parametr zvlášť. [33]



*Obr. 2.9 Konfokální laserový mikroskop [33]*

## 2.3 Geometrie bříty

Třísky musí být při obrábění odváděny od ostří tím nejvhodnějším možným způsobem, přičemž odebírání třísek je ovlivněno zejména základní geometrií nástroje. Tuto geometrii v podstatě chápeme jako způsob upnutí *VBD* v držáku. Existují dvě základní geometrie: pozitivní a negativní. Pozitivní geometrie poskytuje nižší řezné síly a vznik tepla, je zde i lepší odvod třísek. Mezi nevýhody lze zařadit její celkovou pevnost. Negativní geometrie zaručuje celkově pevný nástroj, ale s vyššími řeznými silami, velkým množstvím vzniklého tepla a horším odvodem třísek. Skutečná geometrie se však nenachází na samotném bříty. Je složena ze tří částí: geometrie ostří, geometrie T-fazetky, geometrie utvářeče třísek. Všechny tyto geometrie musí být správně zkombinovány. [34]



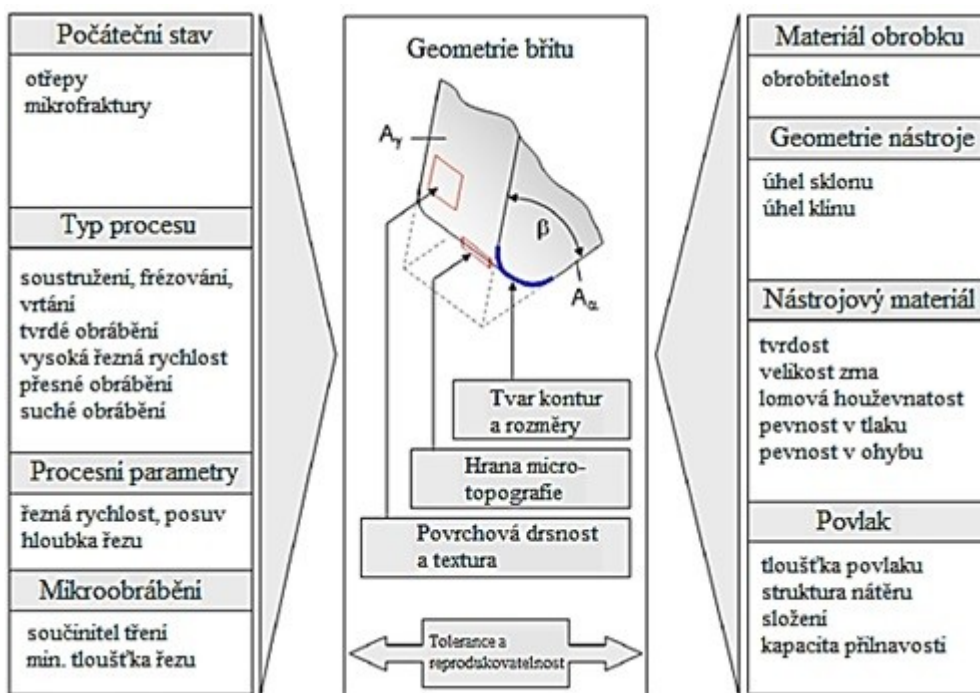
Obr. 2.10 Řezná geometrie [34]

Geometrie T-fazetky je v podstatě přechodová oblast mezi geometrií bříty a geometrií utvářeče třísky, je pozitivní a negativní. Pozitivní je určena pro obrábění nerezových ocelí a vysokopevných slitin, vytváří méně tepla, způsobuje menší opotřebení bříty, zvyšuje kapacitu řezné rychlosti, působící tlak je menší a snižuje síly řezání. Nevýhodou je poměrně vyšší koncentrace napětí na bříty a zvýšené riziko vyštipování bříty. Geometrií bříty je ovlivněna životnost ostří nástroje. Jestliže má být plně využita geometrie ostří, je potřeba se řídit tímto pravidlem: posuv je větší než velikost těchto geometrií. [34]



Obr. 2.11 Další faktory geometrie [34]

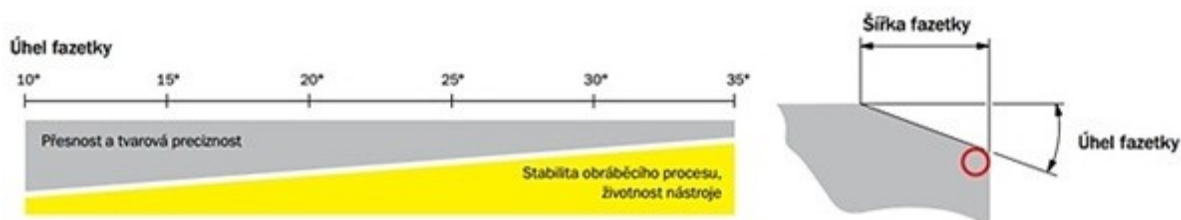
Aby bylo možné definovat odpovídající geometrii bříty a přípravu na konkrétní aplikaci, je nutné vzít v úvahu následující aspekty: počáteční stav bříty, typ procesu obrábění, procesní parametry, velikost účinku a aspekty mikroobrábění, materiál obrobku, nástrojový materiál, makro geometrii a požadovaný povlak. [17]



Obr. 2.12 Faktory ovlivňující výběr a design geometrie ostří [17]

Vybraný nebo navržený břit nástroje by měl splňovat několik požadavků. Geometrie musí být dostatečná pro podporu síly a dynamiky generované při obrábění a kombinace parametrů řezání. Výše uvedené aspekty návrhu souvisí s vlastnostmi materiálu, nástroje a obrobitelností daného materiálu. [17]

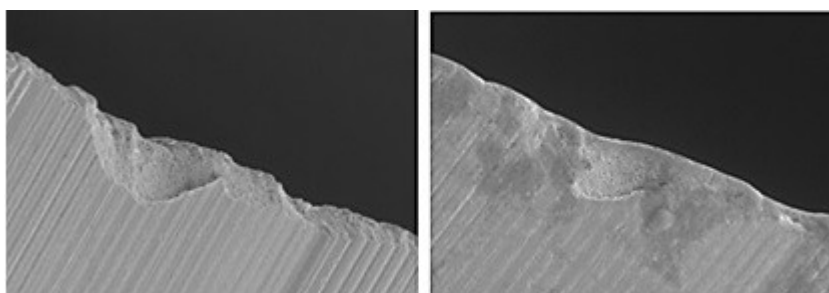
Obecně lze také říci, že širší fazetka rozloží síly řezání na větší plochu, tedy se zvyšuje odolnost bříty, což umožňuje použití vyšších posuvových rychlostí. Jestliže je největší prioritou stabilita obráběcího procesu a životnost nástroje, dosažení nejlepších hodnot zaručuje použití větší fazetky. Jakmile je hlavním požadavkem kvalita opracované plochy a určitá přesnost, použijeme *VBD* s malou fazetkou. [35]



Obr. 2.13 Úhel a šířka fazetky [35]

## 2.4 Způsoby úpravy ostří

V dnešní době jsou jako materiály pro povlakované řezné nástroje používány SK a rychlořezné oceli. Pozornost je třeba věnovat přípravě nástroje na depozici u SK z důvodu velké křehkosti materiálu a náchylnosti ostrých hran k odštípnutí. Při manipulaci s nástroji je třeba se vyhýbat prudkým nárazům, jejich kontaktu a také dlouhým procesům čištění v ultrazvukové lázni. Úprava břitu je provedena některým ze způsobů finišování povrchů – otryskávání, mokré pískování, kartáčování, omílání. Po finišování povrchu následuje chemické čištění v ultrazvukové lázni a následné osušení nástroje. Na úplný závěr jsou nástroje upevňovány do držáku a vloženy do depoziční komory. Zde následuje poslední etapa čištění daného substrátu – iontové čištění. V případě redepozice povlakovaného nástroje, předchází všem těmto procesům ještě postup odstranění vrstvy – stripping. [36]



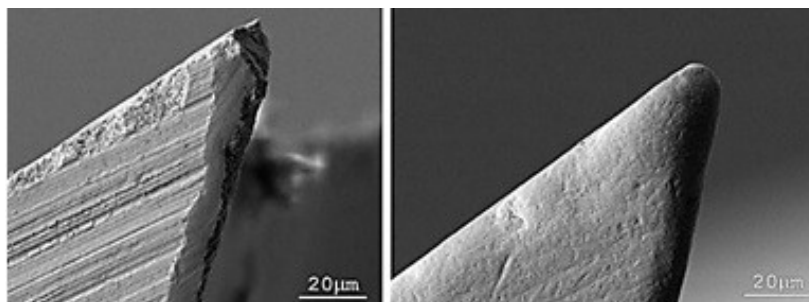
Obr. 2.14 Břit nástroje – vlevo před, vpravo po úpravě [36]

Břity řezných nástrojů jsou obecně po broušení různě „otřepené“ a plné vad. Místa s těmito defekty jsou náchylné na porušení tenké vrstvy po jejich napovlakování. Na ostrém břitu se často soustřeďuje napětí a způsobuje porušení tenké vrstvy ještě před upevněním nástroje při obrábění, a to z důvodu zbytkových pnutí v tenké vrstvě. Při úpravě povrchové vrstvy dojde ke změnám mikrogeometrie povrchu v řádech mikrometrů a je dosaženo zvýšení životnosti nástroje až o 200 % oproti nástroji s neopraveným ostřím. [36]

### 2.4.1 Omílání

Omílání v granulátech s abrazivní pastou je metoda dobře redukovatelná, je dosaženo uspokojujících výsledků i pro použití větších sérií nástrojů. Jako granulát může být použita velmi rozsáhlá řada materiálů. Jedná se o granuláty na bázi oxidů určitých kovů přes keramická tělíska až po rozdrčené skořápky ořechů. Při úpravě jsou odstraněny mikročástice z povlaku a snižuje se drsnost. Pečlivě se musí provádět i volba doby úpravy a typ použitého média. [37]





*Obr. 2.15 Omíláním břitu nástrojů se dosahuje eliminace odlupování povlaků na ostrých přerušovaných hranách [37]*

#### 2.4.2 Kartáčování

Mezi další způsoby úpravy ostří se řadí omílání kartáčem s několika druhy vláken. Jako materiál vláken lze použít ocel, případně různá tvrdá polymerní vlákna integrovaná abrazivem. Je vyloučeno používat kartáčování jako technologii, která upravuje břity před povlakováním. Může se uvést spousta výhod, ale je zde ovšem velmi podstatná nevýhoda spočívající v nalepování materiálu vláken na ostří nástrojů. [36, 37]



*Obr. 2.16 Kartáčování pomocí nylonových vláken [36]*

#### 2.4.3 Pískování

Pískování (mikropískování) je určitá průmyslová metoda pro případ sériové výroby vhodných substrátů nebo pro zvláštní případy. Lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu nebo nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. Jako vhodné médium lze použít abrazivo SiC, případně Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Některá média, která se mohou použít, nejsou vhodná, protože jejich zůstatek negativně ovlivňuje adhezi povlaků. Celková velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hodnotách. Bez dlouhodobých experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům – odpískování měkčích fází, zaoblení břitu nebo zmatnění zrcadlových ploch. Proces je možné taktéž provádět za sucha a za mokra. [36]

#### 2.4.4 Otryskávání

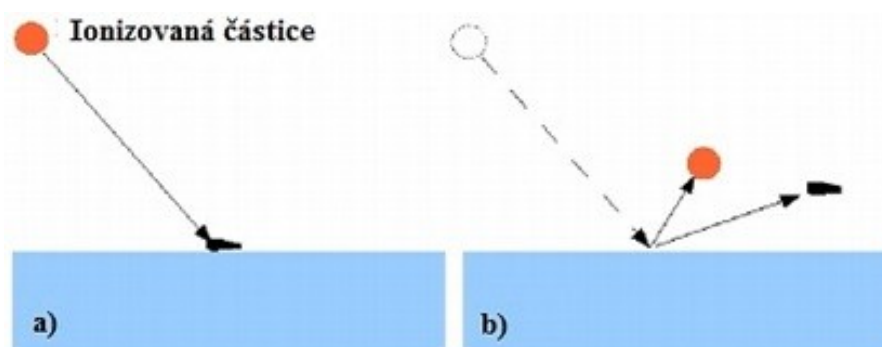
Tímto principem se provádí otryskávání proudem vzduchu, kterým je unášeno jemné abrazivo. Dopadem částic o vysoké rychlosti dojde k abrazivnímu opotřebení, jehož rozsah musí záviset na určitých faktorech – rychlost a úhel dopadu částic, na jejich tvaru a hmotnosti. Jako abraziva lze použít – přírodní oxidy (minerální abraziva), kovová abraziva (broky), strusku, syntetická abraziva a diamantový prášek. [36]

#### 2.4.5 Chemické čištění

Prvořadým úkolem chemického čištění je zbavit povrch organických nečistot – mastnoty, prachu, brusiva a jiných pevných částic ulpělých na povrchu. Jako čisticí kapaliny lze použít alifatické uhlovodíky – alkoholy na ropné bázi, mastné kyseliny. K zintenzivnění čistícího procesu se využívá ultrazvuk. Pozornost je třeba věnovat uložení nástrojů. Nástroje by se neměly dotýkat a měl by být omezen jejich kontakt s tvrdými materiály. Při nedodržení těchto zásad může dojít k vyštípnutí ostří a k rozvoji trhlin. Po chemickém čištění následuje vysušení (vakuové sušičky). [36]

#### 2.4.6 Iontové čištění

Principem tohoto čištění je přívod záporného předpětí a dopad takto urychlených iontů na substrát. Ionty při dopadu na substrát odstraňují mikronečistoty ulpělé na povrchu. Iontový bombard má ve většině případů dvě fáze. V první fázi dojde k ionizaci atomů plynu, který je umístěn do komory. Příkladem takového plynu je argon. Ionizované atomy plynu jsou záporným předpětím substrátu urychlovány a dopadají na substrát, ze kterého jsou odstraňovány atomy nečistot. Druhá fáze pokračuje vypuštěním komory a přiložením nízkonapěťového zdroje elektrického oblouku na depoziční katody. Dopadem iontů je substrát zcela vyčištěn. [36]



Obr. 2.17 Iontového čištění povrchu – a) dopad částice a b) odstranění nečistot [36]



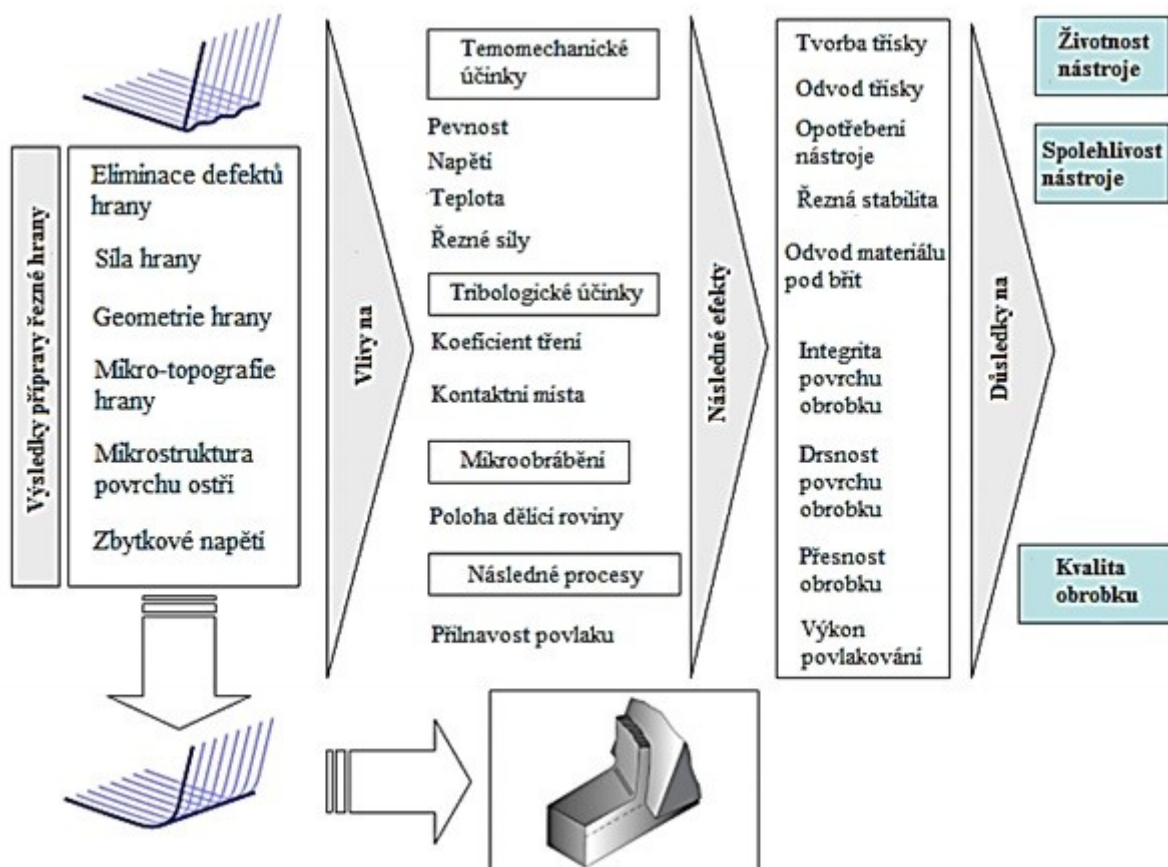
## 2.5 Vliv úpravy břitu nástroje na proces obrábění

Proces přípravy změni mikro-topografii břitu a upravuje mikro-strukturování povrchu v blízkosti ostří řezného nástroje. Všechny tyto aspekty přípravy břitu mají vliv na proces obrábění. Obr. 2.18 ukazuje všechny dopady, vlivy a důsledky při přípravě ostří. Geometrie břitu ovlivňuje termomechanické aspekty procesu obrábění: [17]

- tvar deformačních zón,
- rozložení teplot při obrábění,
- síly řezání,
- rozložení sil při obrábění.

Tyto účinky pak ovlivňují:

- tvoření a odvod třísek,
- integritu povrchu (zbytková napětí),
- drsnost povrchu obrobku,
- odolnost nástroje proti opotřebení.

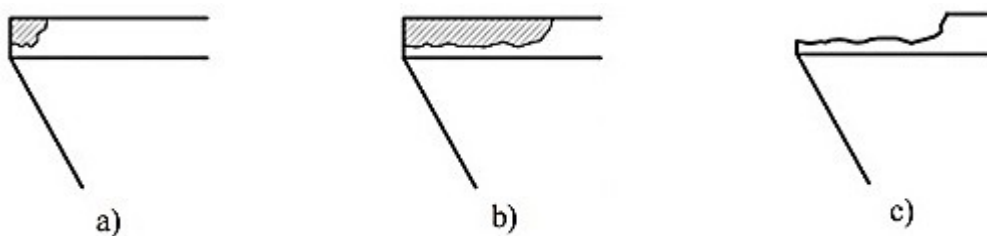


Obr. 2.18 Vliv úpravy břitu nástroje na proces obrábění [17]

### 3. STANOVENÍ VLIVU ZAOBLENÍ OSTŘÍ NA PRŮBĚH OPOTŘEBENÍ A TRVANLIVOSTI NÁSTROJE

#### 3.1 Charakteristika objemového opotřebení nástroje

Opotřebení je odjakživa 3D fenomén. Nicméně od doby svého vzniku je opotřebení nástroje, z historického hlediska, měřeno pouze v 1D. Nejčastěji bylo opotřebení hřbetu označováno za životnost nástroje v minutách. Jen tak málo se změnilo za posledních 100 let. Posouzení aktuálního stavu opotřebení nástroje ukazuje nedostatečnost zachytit skutečný stav opotřebení nástroje, a to i po standardizaci ISO – studie opotřebení nástroje však nejsou srovnatelné. [45]



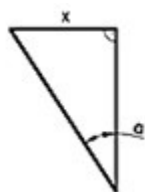
Obr. 3.1 Klasifikace opotřebení nástroje pro stejnou hodnotu VB[45]

Na obr. 3.1 je znázorněno nerovné škrábnutí na boku břitu (a) a (b), a opotřebovávaný materiál (c) a jsou vždy kvantifikovány se stejnou hodnotou VB. Tyto a mnohé další nesrovnalosti mají snahu řídit kritickou potřebu pro komplexnější a jednotnou definici opotřebení nástroje. Právem tak bylo opotřebení nástrojů historicky popisováno jako „jednoznačně obtížně definovatelné“. Pro rozpoznávání této kritické potřeby byla vyvinuta nová objemová metodika pro hodnocení opotřebení, která poskytla potřebnou kvalifikaci opotřebení obráběcího nástroje. [45]

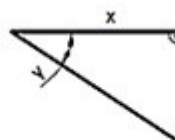
##### 3.1.1 Objemové opotřebení u ostrého břitu

Při výpočtu objemového opotřebení u ostrého břitu byly využity znalosti goniometrických funkcí a výpočet byl vždy proveden pro určitý interval. Proběhla také volba velikosti opotřebení na hřbetě  $x$  od 0 do 0,1 mm.

I. interval:  $x = \langle 0; 0,1 \rangle$



$$S_{1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{\tan \alpha}$$

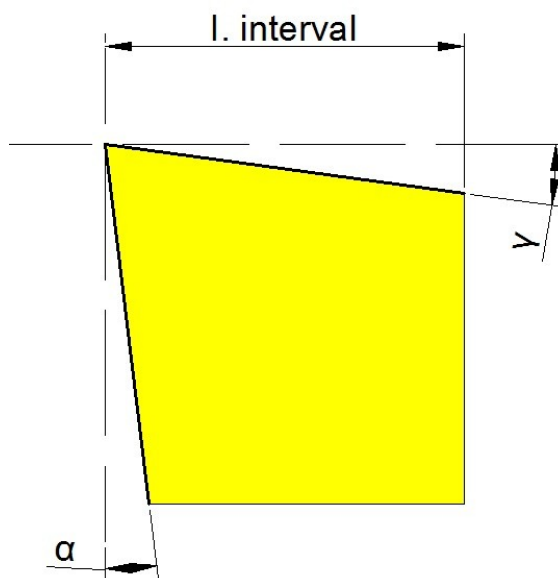


$$S_{2(x)} = \frac{1}{2} \cdot x^2 \cdot \tan \gamma$$

$$S_{A(x)} = S_{1(x)} - S_{2(x)} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.1)$$

$$S_{A(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x^2}{\tan \alpha} - x^2 \cdot \tan \gamma \right) \quad [\text{mm}^2] \quad (3.2)$$

$$V_{AI} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x^2}{\tan \alpha} - x^2 \cdot \tan \gamma \right) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.3)$$

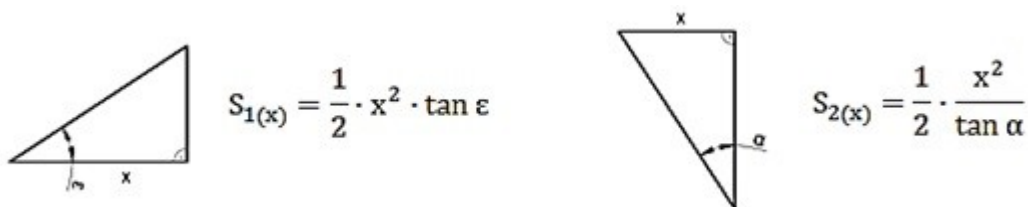


Obr. 3.2 Ostrý břit

### 3.1.2 Objemové opotřebení u břítu s fazetkou

Při výpočtu objemového opotřebení u břítu s fazetkou byly využity znalosti goniometrických funkcí, výpočet byl vždy proveden pro určitý interval (zde byl břit rozdělen na dva intervaly). U II. Intervalu je plocha  $B_I$  konstanta a ostatní plochy byly závislé na hloubce opotřebení  $x$ .

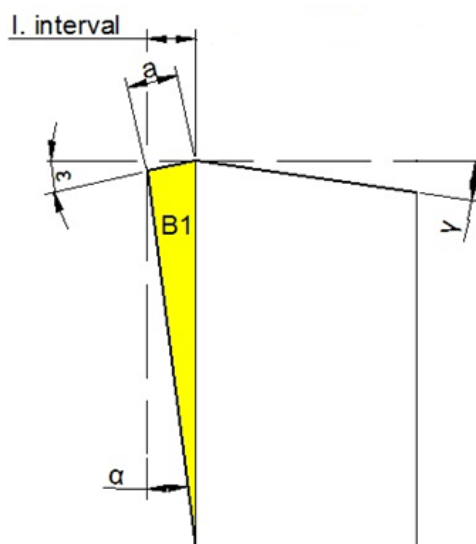
**I. interval:**  $x = \langle 0; a \cdot \cos \varepsilon \rangle$



$$S_{B1(x)} = S_{1(x)} + S_{2(x)} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.4)$$

$$S_{B1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left( x^2 \cdot \tan \varepsilon + \frac{x^2}{\tan \alpha} \right) \quad [\text{mm}^2] \quad (3.5)$$

$$V_{BI} = \frac{1}{2} \cdot \left( x^2 \cdot \tan \varepsilon + \frac{x^2}{\tan \alpha} \right) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.6)$$

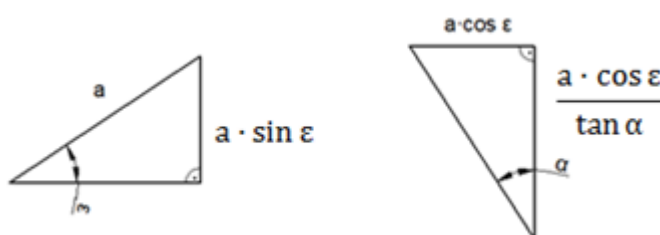


Obr. 3.3 Břit s fazetkou (I. interval)

**II. interval:**  $x = \langle a \cdot \cos \varepsilon; 0, 1 \rangle$

$$S_{B1}: S_{B1} = \frac{1}{2} \cdot \left( a^2 \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \tan \varepsilon + \frac{a^2 \cdot \cos^2 \varepsilon}{\tan \alpha} \right) \quad [\text{mm}^2] \quad (3.7)$$

$S_{B2(x)}:$



$$S_{B2(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{a \cdot \cos \varepsilon}{\tan \alpha} + a \cdot \sin \varepsilon \right) \cdot (x - a \cdot \cos \varepsilon) \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.8)$$

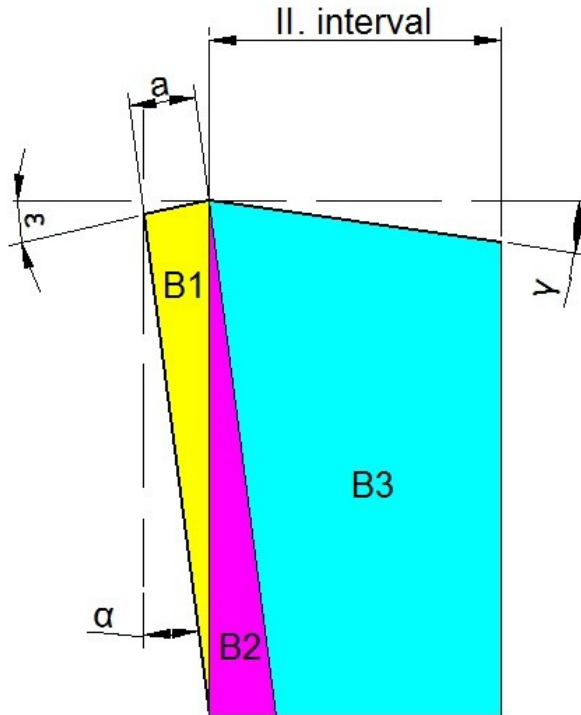
$S_{B3(x)}:$

$$S_{1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x - a \cdot \cos \varepsilon)^2}{\tan \alpha} \quad S_{2(x)} = \frac{1}{2} \cdot (x - a \cdot \cos \varepsilon)^2 \cdot \tan \gamma$$

$$S_{B3(x)} = S_{1(x)} - S_{2(x)} \quad [\text{mm}^2]$$

$$S_{B3(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{(x - a \cdot \cos \varepsilon)^2}{\tan \alpha} - (x - a \cdot \cos \varepsilon)^2 \cdot \tan \gamma \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.9)$$

$$V_{BII} = (S_{B1} + S_{B2(x)} + S_{B3(x)}) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.10)$$



Obr. 3.4 Břit s fazetkou (II. interval)

### 3.1.3 Objemové opotřebení u rektifikovaného ostří

Při výpočtu objemového opotřebení u rektifikovaného ostří byly využity znalosti výpočtu kruhové úseče a goniometrických funkcí, výpočet byl vždy proveden pro určitý interval (zde byl břit rozdělen na tři intervaly). U II. Intervalu je plocha  $C_1$  konstanta a ostatní plochy byly závislé na hloubce opotřebení  $x$ . U III. intervalu jsou plochy  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  konstanty a ostatní plochy byly závislé na hloubce opotřebení  $x$ .

**I. interval:**  $x = \langle 0; r \cdot (1 - \cos \alpha) \rangle$

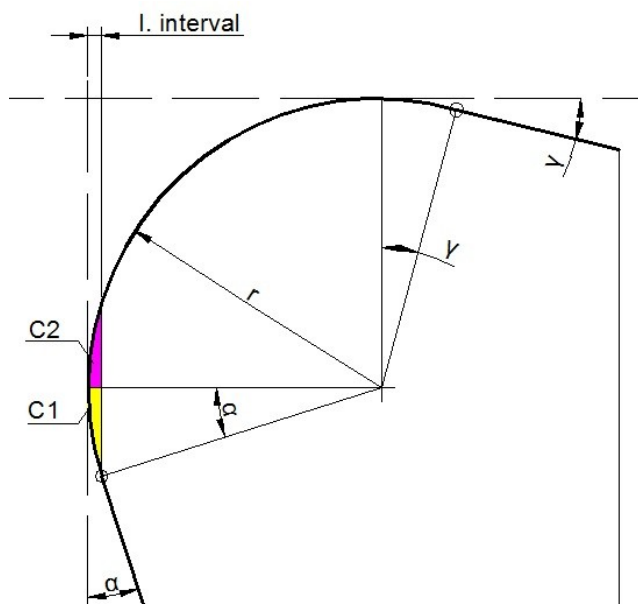
Jelikož známe výšku a poloměr kruhové úseče, byl použit následující vzorec.

$$S_{C1(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-x}{r}\right) - (r-x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2} \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.11)$$

$$S_{C2(x)} = S_{C1(x)} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.12)$$

$$V_{CI} = (S_{C1(x)} + S_{C2(x)}) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.13)$$

$$V_{CI} = \left[ r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-x}{r}\right) - (r-x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2} \right] \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.14)$$



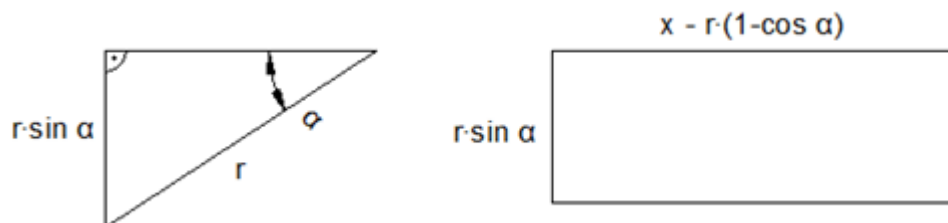
Obr. 3.5 Rektifikované ostří (I. interval)

**II. interval:**  $x = \langle r \cdot (1 - \cos \alpha); r \cdot (1 + \sin \gamma) \rangle$

$$S_{C1}: S_{C1} = \frac{1}{2} \cdot \left[ r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r \cdot \cos \alpha}{r}\right) - (r \cdot \cos \alpha) \cdot \sqrt{2 \cdot r^2 \cdot (1 - \cos \alpha) - r^2 \cdot (1 - \cos \alpha)^2} \right] \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.15)$$

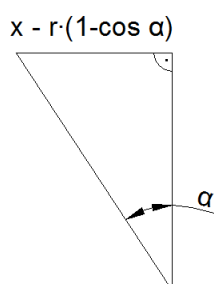
$$S_{C2(x)}: S_{C2(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-x}{r}\right) - (r-x) \cdot \sqrt{2 \cdot x \cdot r - x^2} \right] \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.16)$$

$S_{C3(x)}:$



$$S_{C3(x)} = r \cdot \sin \alpha \cdot (x - r \cdot (1 - \cos \alpha)) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.17)$$

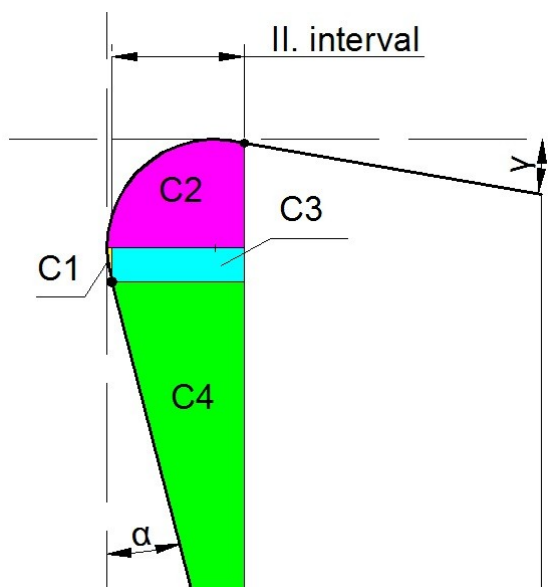
$S_{C4(x)}:$



$$S_{C4(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ (x - r \cdot (1 - \cos \alpha)) \cdot \frac{x - r \cdot (1 - \cos \alpha)}{\tan \alpha} \right] \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.18)$$

$$S_{C4(x)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x-r \cdot (1-\cos \alpha))^2}{\tan \alpha} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.19)$$

$$V_{CII} = (S_{C1} + S_{C2(x)} + S_{C3(x)} + S_{C4(x)}) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.20)$$



Obr. 3.6 Rektifikované ostří (II. interval)

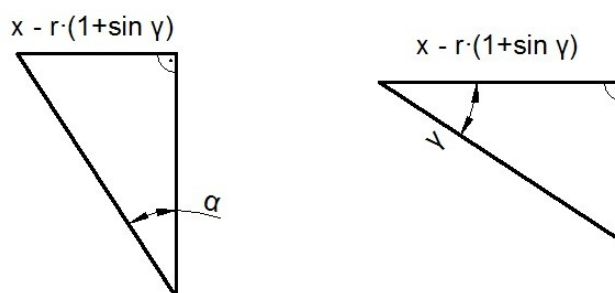
**III. interval:**  $\mathbf{x} = \langle \mathbf{r} \cdot (1 + \sin \gamma) ; 0, 1 \rangle$

$$S_{C2}: \quad S_{C2} = \frac{1}{2} \cdot \left[ r^2 \cdot \arccos \left( \frac{-r \cdot \sin \gamma}{r} \right) - r \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{2 \cdot r^2 \cdot (1 + \sin \gamma) - r^2 \cdot (1 + \sin \gamma)^2} \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.21)$$

$$S_{C3}: \quad S_{C3} = r \cdot \sin \alpha \cdot [r \cdot (1 + \sin \gamma) - r \cdot (1 - \cos \alpha)] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.22)$$

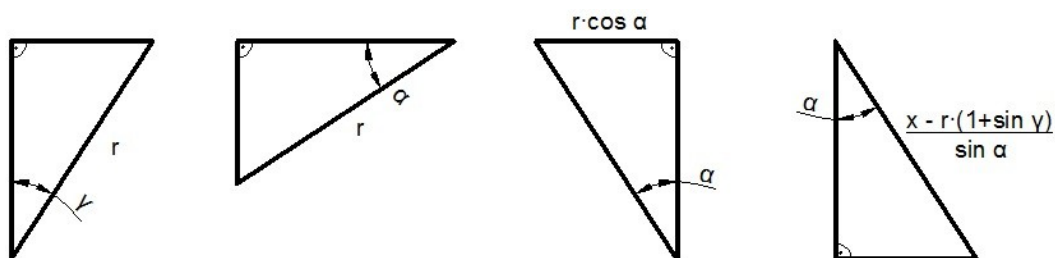
$$S_{C4}: \quad S_{C4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{[r \cdot (1 + \sin \gamma) - r \cdot (1 - \cos \alpha)]^2}{\tan \alpha} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.23)$$

$S_{C5(x)}:$



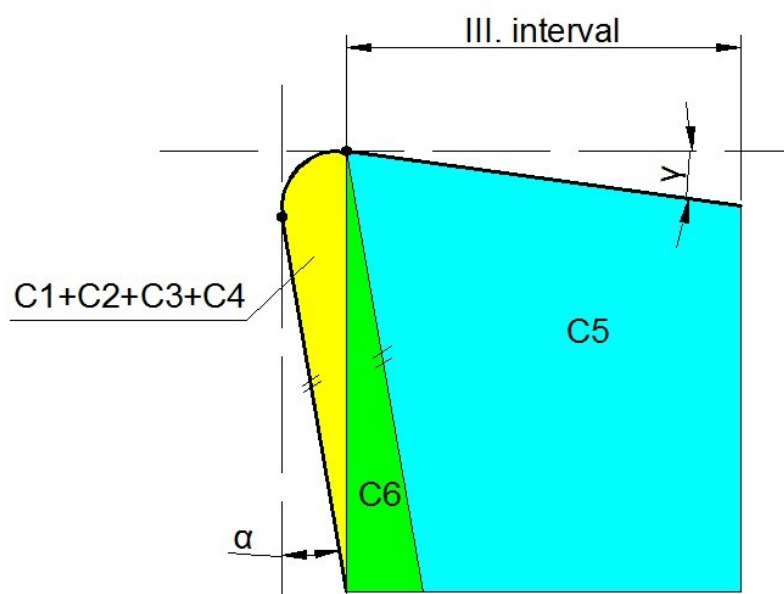
$$S_{C5(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{(x - r \cdot (1 + \sin \gamma))^2}{\tan \alpha} - (x - r \cdot (1 + \sin \gamma))^2 \cdot \tan \gamma \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.24)$$

$S_{C6(x)}$ :



$$S_{C6(x)} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( r \cdot \cos \gamma + r \cdot \sin \alpha + \frac{r \cdot \cos \alpha}{\tan \alpha} \right) \cdot \left( x - r \cdot (1 + \sin \gamma) \right) \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.25)$$

$$V_{\text{CIII}} = (S_{C1} + S_{C2} + S_{C3} + S_{C4} + S_{C5(x)} + S_{C6(x)}) \cdot a_p \quad [\text{mm}^3] \quad (3.26)$$



Obr. 3.7 Rektifikované ostří (III. interval)



## 4. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

V experimentální činnosti byla provedena volba obráběného materiálu. Slitina hliníku AW-2014 patří mezi nejdostupnější hliníkové slitiny na bázi mědi, běžně používaná v leteckém průmyslu, strojírenství a automobilovém průmyslu. Pro obrábění byl zvolen obráběcí stroj od firmy DGM MORI. Konstrukce CNC soustruhu je charakterizována velmi dobrou tuhostí a zajišťuje stabilitu rychlosti při opracování. Na přesnost obrobených ploch a výkon obrábění má vliv především tuhost obráběcího stroje. Při experimentu byly použity VBD s poloměrem zaoblením ostří  $r_n = 0 - 5 \mu\text{m}$ ,  $r_n = 10 - 15 \mu\text{m}$  a  $r_n = 20 - 25 \mu\text{m}$ . Dalším důležitým faktorem je volba řezných podmínek, při kterých bude obrábění nejefektivnější. Je potřeba zvolit optimální řezné podmínky z hlediska použitého řezného materiálu, typů a tvarů použitých nástrojů. Stanovení řezných podmínek v experimentální části je podmíněno určením všech předpokladů obrábění. Při obrábění hliníkových slitin lze použít vyšší řezné rychlosti, závisí ale na zvolené metodě obrábění a druhu nástrojového materiálu.

### 4.1 Slitina hliníku AW-2014

Pro experimentální část obrábění byla navržena hliníková slitina EN AW-2014 podle mezinárodního označení (AlCu<sub>4</sub>SiMg). Tato slitina patří do materiálů, které se vyznačují vysokou pevností. Svařitelnost těchto slitin je velmi špatná (tendence k prasknutí). Běžně je tato hliníková slitina používána pro konstrukce, které vyžadují vysokou pevnost, avšak riziko koroze zde musí být velmi nízké. [46]

Jedná se o standardní hliníkovou slitinu skupiny AlCuMg s 4,5 % mědi jako hlavní složkou. Dalšími prvky, které mají zastoupení ve struktuře materiálu, jsou křemík, mangan, hořčík a železo. Vývoj slitiny AlCuMg se datuje již do roku 1906, kdy byly využívány hliníkové vynálezy. Původní slitiny obsahovaly asi 3,5 – 5,5 % mědi. Na základě těchto vlastností došlo k průlomu využívání hliníku. Hliníková slitina se vyznačuje výbornými mechanickými vlastnostmi, které jsou vyšší než u slitiny 2011 a 2017A. Nyní je možno díky vytvrzení dosáhnout mnohem vyšší pevnosti. Díky dobrým vlastnostem se rozšiřují spektra pro následné použití a je možné sledovat nové slitiny na trhu. [46]

Tab. 4.1 Chemické složení slitiny hliníku AW-2014 [20]

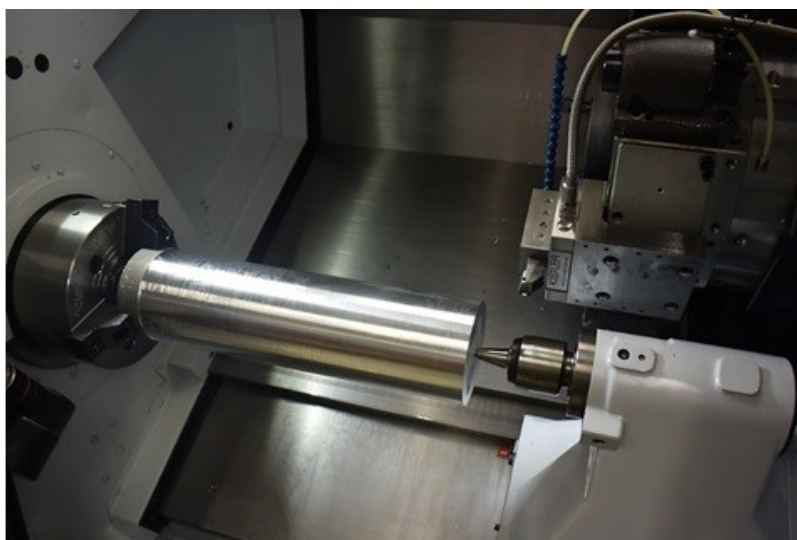
Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	H2
Chem. složení v hm. %	0,62	0,19	4,50	0,70	0,72	0,05	0,01	0,10	0,03	0,01	0,10

Tab. 4.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny hliníku AW-2014 [20]

<b>Mechanické vlastnosti</b>	Mez pevnosti $R_m$	min. 465 MPa
	Mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 420 MPa
	Tažnost $A_5$	min. 7 %
<b>Fyzikální vlastnosti</b>	Měrná tepelná kapacita $c$	880 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
	Tepelná vodivost $\lambda$	154 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
	Hustota $\rho$	2,8 g.cm <sup>-3</sup>

## 4.2 Volba obráběcího stroje a upnutí obrobku

Pro podélné soustružení polotovaru ve tvaru válce byl zvolen horizontální *CNC* soustruh, který vyrobila firma DMG MORI s označením NLX2500MC/700\_M730BM. Soustruh umožňuje opracovávat maximální průměr obrobku 366 mm s plynulou změnou otáček, která při obrábění materiálu udržuje konstantní řeznou rychlost. Experimentální obrábění bylo provedeno v areálu VŠB – TU Ostrava v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské technologie, kde je tento *CNC* soustruh umístěn. Pro větší bezpečnost bylo upnutí obrobku o průměru 140 mm realizováno pomocí čelistí ve sklíčidle a podepřeno hrotem.



Obr. 4.1 Realizace upnutí obráběného materiálu

Stroje od firmy DMG MORI lze označovat za nejkomplexnější a vysoce kvalitní řadu obráběcích strojů na trhu. Konstrukce *CNC* soustruhu je charakterizována velkou tuhostí, vysokou přesností a prostorně úsporným designem. Díky těmto parametrům je možno obrábět různé druhy obrobků a materiálů. Model nabízí *BMT* (vestavěný motor), pomocí kterého je dosahováno výkonného soustružení. [47]

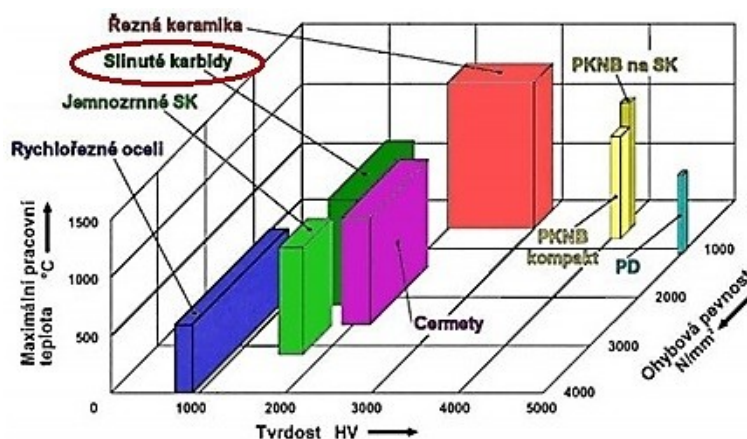
Model NLX2500MC/700\_M730BM používá kluzné vedení, proto může nabídnout delší životnost nástroje a mnoho možností pro těžké obrábění. Firma vyvinula technologii pro cirkulaci procesní kapaliny, jako opatření proti tepelným deformacím, které mohou přímo ovlivňovat přesnost obrábění. [47]



Obr. 4.2 CNC soustružnické centrum od firmy DMG MORISEIKI - NLX 2500/700

### 4.3 Volba řezného nástroje

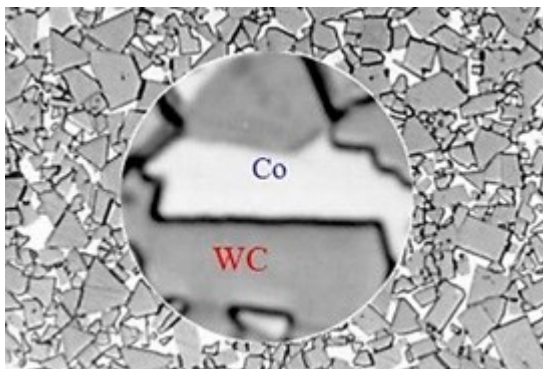
Současné požadavky, na zvyšování produktivity a snižování výrobních nákladů v oblasti třískového obrábění, vedou ke snižování výrobních časů, dále pak na rozměrové a tvarové přesnosti a především ke zlepšení integrity opracovaného povrchu. Aby bylo možné těchto cílů dosáhnout, je nutné zohlednit veškeré vývojové trendy z oblasti obrábění. Dalším základem uspokojivých výsledků je v první řadě volba materiálu. Z těchto aspektů mohou vyplývat zvyšující se požadavky na nové řezné nástroje pro obrábění. Proto je potřeba neustále vyvíjet nové řezné nástroje.



Obr. 4.3 Oblasti nástrojových materiálů [9]

#### 4.3.1 Nástroje ze slinutého karbidu

Ostří je označováno za nejdůležitější část řezného nástroje. Závisí na něm průběh vlastního procesu obrábění. Proto je velmi nutné věnovat samotné volbě materiálu řezného nástroje velkou pozornost. Slinuté karbidy se vyznačují jedinečnou kombinací odolnosti proti opotřebení a houževnatosti. Lze je formovat do složitých tvarů. V současnosti prezentují většinu vyměnitelných břitových destiček používaných pro řezné nástroje. [38]



Obr. 4.4 Struktura slinutého karbidu [38]

Hlavní složkou SK je karbid wolframu, karbid titanu a kobalt, který zde plní funkci pojiva. Vzhledem k vysokým požadavkům na tvrdost, pevnost a odolnost proti opotřebení je důležité nejen složení, ale i struktura jednotlivých fází. Při vysokém obsahu pojiva dojde ke snazší plastické deformaci a výraznému zpevnění. Nicméně kobaltové pojivo není zdrojem nárůstu vnitřních zbytkových napětí. U komplexního porovnávání vlastností slinutých karbidů je potřeba počítat i s následným vlivem pojiva a to jak z hlediska jeho schopnosti plastické deformace, tak i s jeho vyčerpáním plastických schopností a následným rozvojem poškození. [38]

#### 4.4 Geometrie řezného nástroje

Charakteristickým znakem pro typ *VBD* je geometrie ostří. Volba správné geometrie břitu je dána obráběcí operací (hrubování, dokončování) a materiálem obrobku. Dalšími faktory, které mohou ovlivnit volbu správné geometrie řezného nástroje je stav stroje, stabilita, výkon a sklon k vibracím. Při volbě geometrie řezného nástroje je potřeba vzít v úvahu i technologické požadavky na přesnost a kvalitu opracovaného povrchu. Geometrie ostří je dána uložením *VBD* v lůžku nástrojového držáku. Mezi základní typy patří pozitivní, negativní a zvláště pozitivní geometrie řezného nástroje. V obrábění jsou z pohledu efektivního způsobu odebrání třísek z obráběného materiálu vhodnější *VBD* s pozitivní řeznou geometrií a velkým úhlem nastavení hlavního břitu.

Vyměnitelná břitová destička: **CCGT 12**

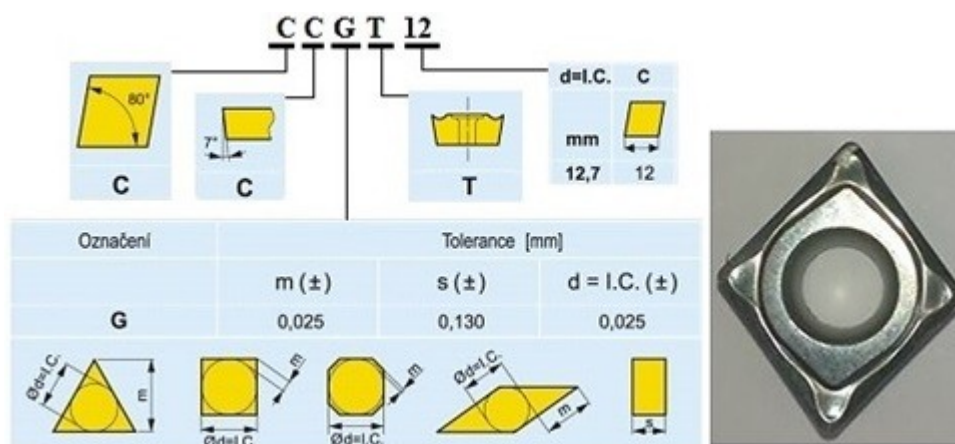
C – tvar destičky,

C – úhel hřbetu,

G – tolerance,

T – provedení,

12 – délka ostří [mm].

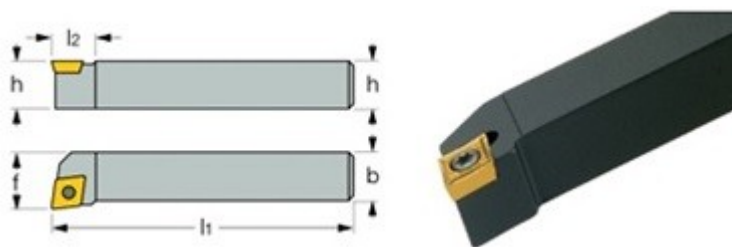


Obr. 4.5 Tvar vyměnitelné břitové destičky

Nástrojový držák: **SCLCR 2525M 12**

Tab. 4.3 Parametry nástrojového držáku SCLCR 2525M 12[39]

h	b	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	f	Ga	Gr
25 mm	25 mm	150 mm	20 mm	32 mm	0°	0°

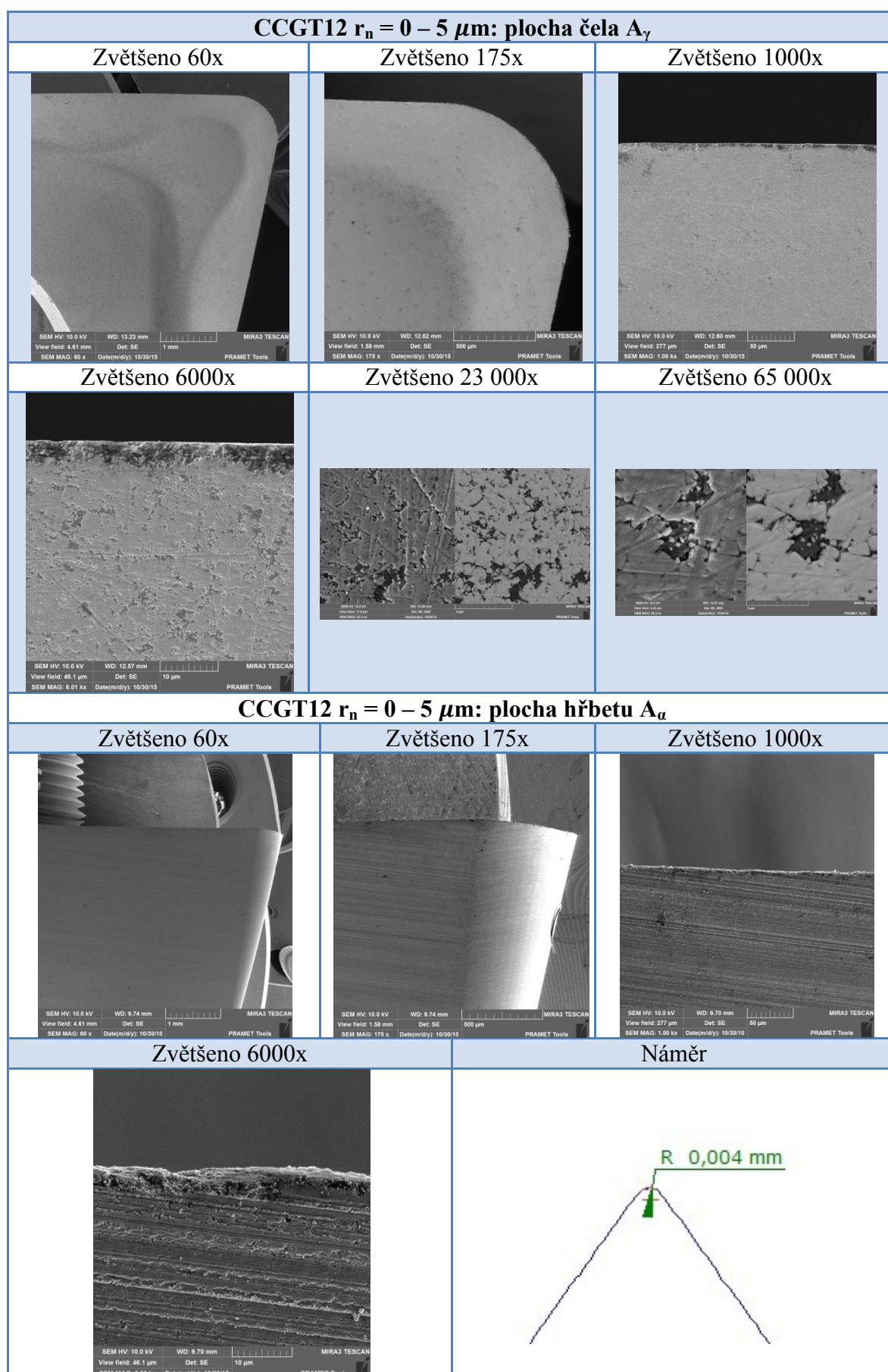


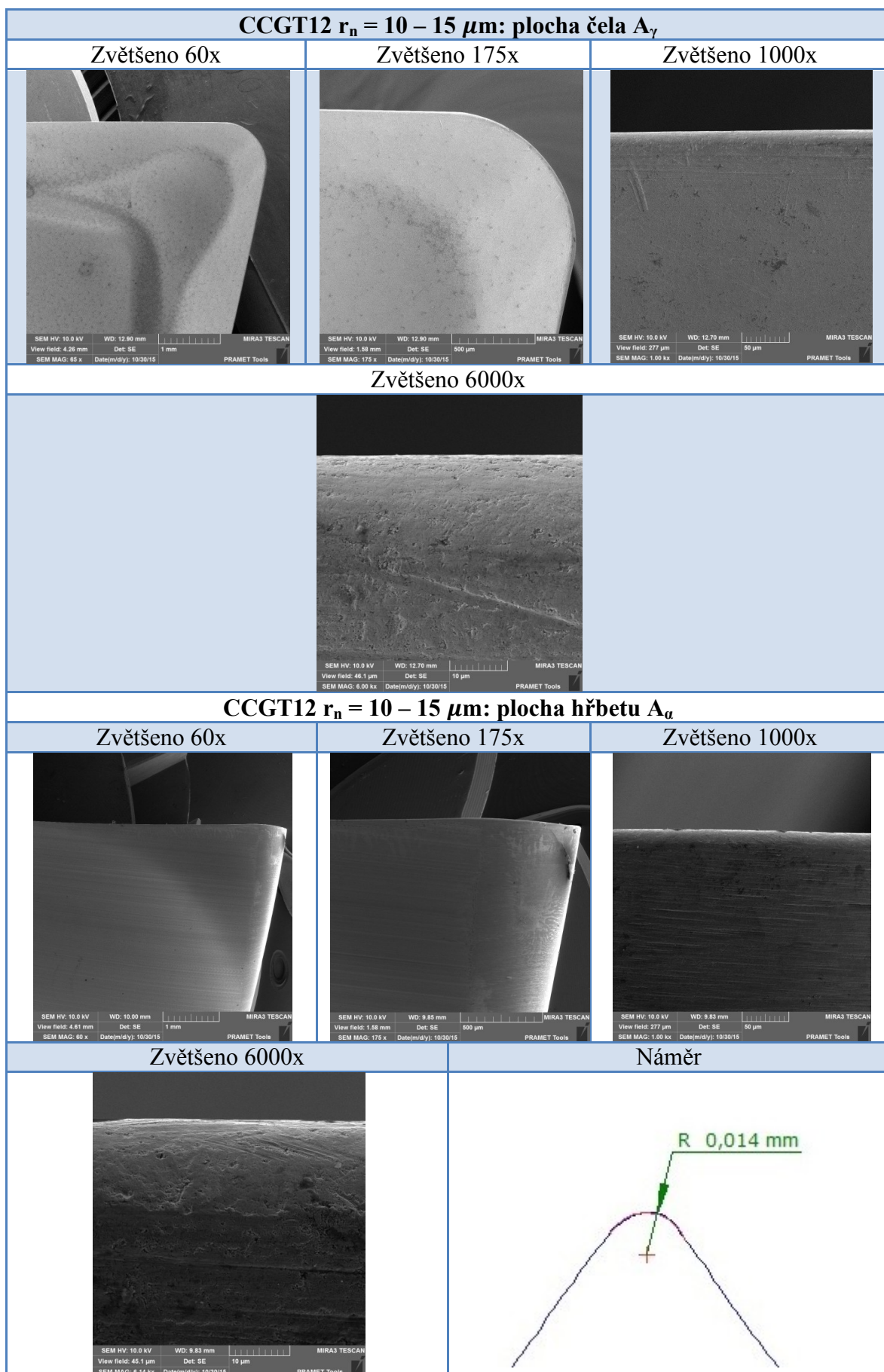
Obr. 4.6 Tvar nástrojového držáku SCLCR 2525M 12 [39]

Několikanásobně zvětšené obrazy zaoblení břitu řezného nástroje v tabulce 4.4 byly pořízeny pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu, pracujícího s úzkým elektronovým paprskem. Oproti optickému mikroskopu je jeho předností zejména velká hloubka ostrosti a možnost dosáhnout mnohem většího zvětšení. Díky pořízeným fotografiím mohlo být zkoumáno neopotřebované zaoblení ostří VBD.

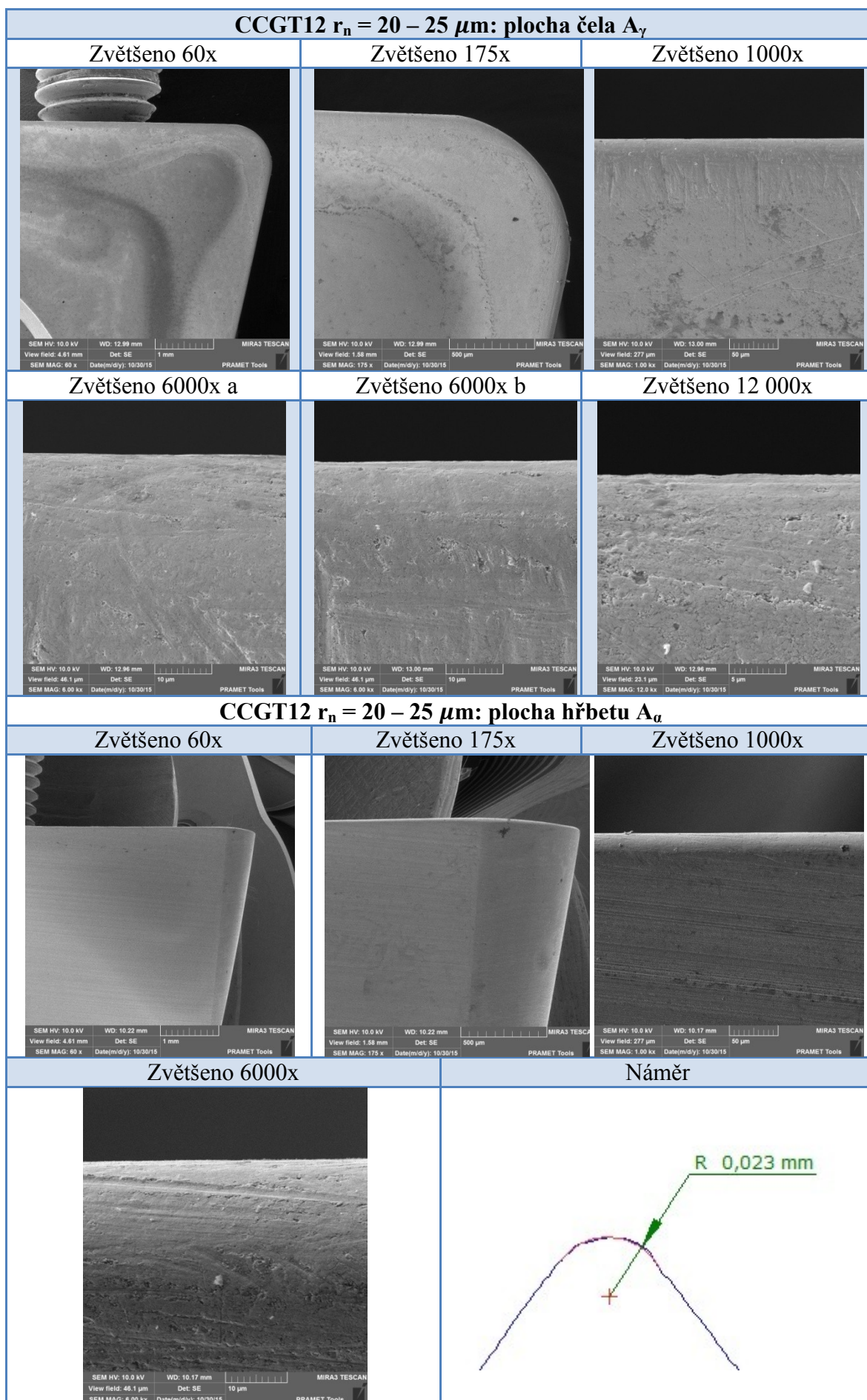


Tab. 4.4 Ostří neopotřebovaných VBD











## 4.5 Volba řezných podmínek

Řeznými podmínkami je možno ovlivňovat výkon soustružení, tzn. množství obrobeného materiálu za časovou jednotku, trvanlivost ostří, síly řezání, jakost obráběné plochy a další kritéria. Snahou je určit vhodné podmínky, při kterých jsou docíleny nejnižší výrobní náklady za nejkratší čas výroby. Volba řezných podmínek je často ovlivněna materiálem nástroje, geometrií břitu, výrobním strojem a danými požadavky na přesnost a drsnost povrchu. Při určování je potřeba dodržovat hledisko požadované přesnosti, přiblížení se k vhodným podmínkám a hledisko vynaložených nákladů na obrábění. Větší přesnost určení znamená vyšší náklady a naopak. Přiblížení se k vhodným řezným podmínkám může také záviset na druhu výroby. Základní způsoby určení podmínek podle náročnosti a přesnosti je možno stanovit: zkusmo, podle tabulek, podle normativů a výpočtem. [28]

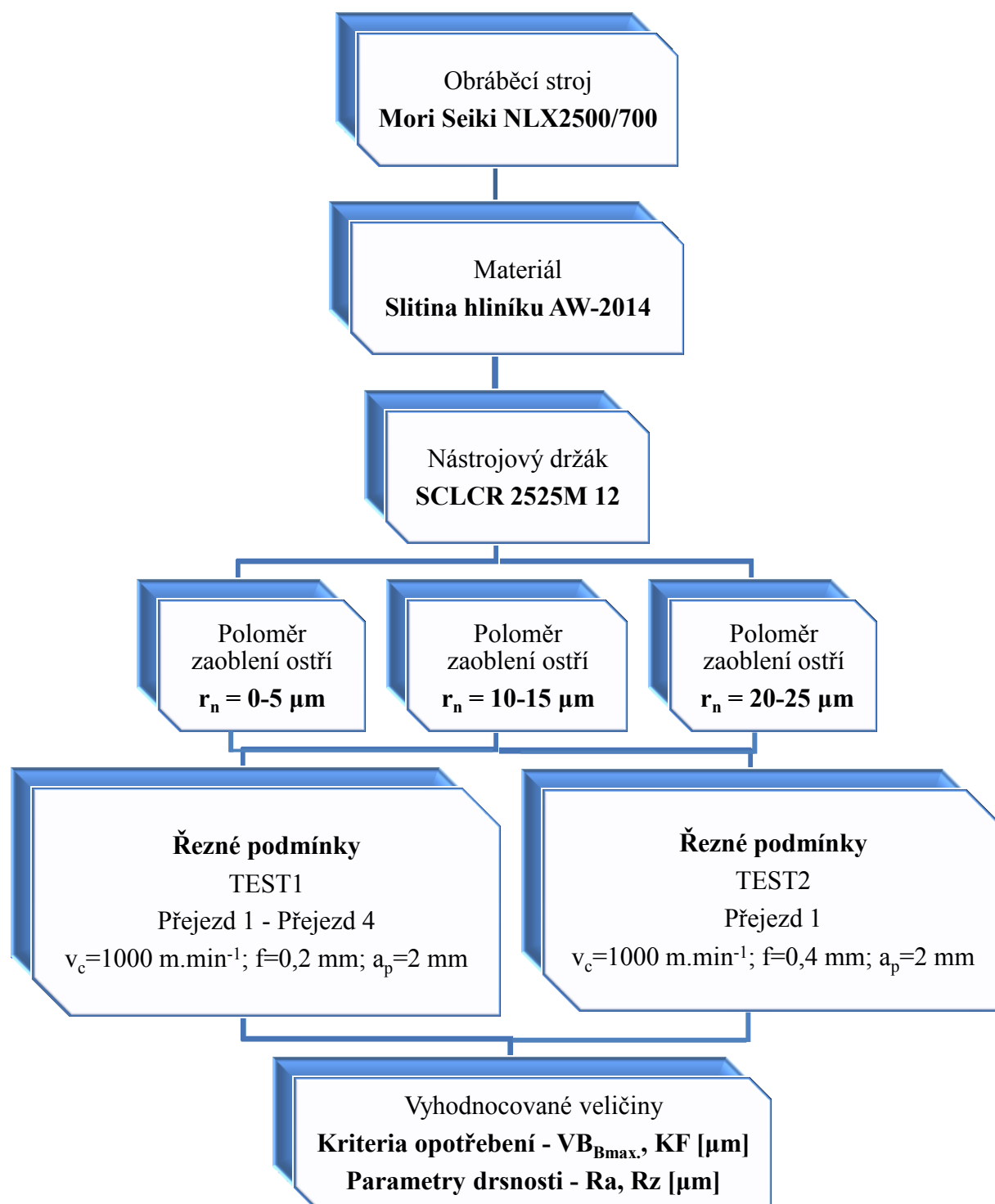
Tab. 4.5 Zvolené řezné podmínky experimentu

Řezné podmínky	Hodnoty
$v_c [m \cdot min^{-1}]$	1000
$f [mm]$	0,2 a 0,4
$a_p [mm]$	2

Samotná volba řezných podmínek může být jednou z nejdůležitějších částí navržené experimentální činnosti. Při stanovení řezných podmínek se nejčastěji zaměřujeme na řeznou rychlost  $v_c$ , posuv  $f$  a hloubku řezu  $a_p$ . Všechny tyto parametry mohou ovlivňovat produktivitu procesu obrábění. Při volbě řezných podmínek je z velké části nutno dbát na obráběný materiál a jeho vlastnosti. Je zcela jasné, že je potřeba na každý materiál aplikovat jiné řezné podmínky. Například pro obrábění hliníku a hliníkových slin lze obecně použít vysokou řeznou rychlost, která ale rychle ovlivňuje intenzitu opotřebení řezného nástroje. Pro správnou funkčnost řezného nástroje je potřeba volit i optimální posuv. Při volbě řezných podmínek byla největší pozornost věnována řezné rychlosti a posuvu. Volba řezných podmínek pro obrábění hliníkové slitiny AW-2014 byla provedena z doporučených hodnot výrobce nástrojů. U nižších řezných rychlostí nevykazovala  $VBD$  známky opotřebení. Proto z důvodu vyšší produktivity obrábění byla navýšena hodnota posuvu z  $f = 0,2$  mm na  $f = 0,4$  mm.

## 4.6 Schéma provedeného experimentu

Pro lepší orientaci bylo navrženo schéma provedeného experimentu (obr. 4.7), kde byly znázorněny jednotlivé kroky této činnosti.



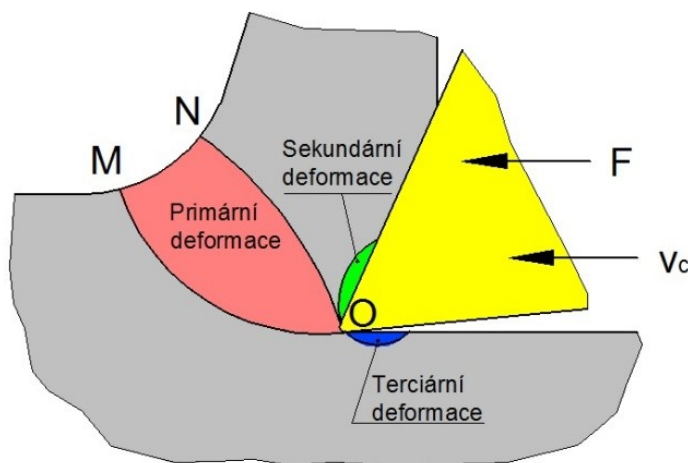
Obr. 4.7 Blokové schéma experimentu

## 5. STANOVENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

Práce byla zaměřena na stanovení vlivu velikosti zaoblení ostří na opotřebení a trvanlivost řezného nástroje. Na volbu velikosti zaoblení bříty má vliv geometrie řezného nástroje, volba obráběného materiálu, druh operace obrábění a rovněž se muselo přihlídnout k volbě velikosti špičky řezného nástroje. Postupně byly porovnávány břitové destičky s poloměrem zaoblením bříty  $r_n = 0\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ . Použitím ostrého bříty řezného nástroje byly generovány nízké řezné síly, snižovalo se riziko vzniku nárůstku a prodlužovala se životnost řezného nástroje. Ostrý břit nástroje nebyl ovšem stabilní, hrozilo vyštipování ostří a zkrácení životnosti nástroje. Zaoblené ostří nástroje zajišťovalo vyšší pevnost a odolnost proti vyštipování a lomu destičky. Produkce řezných sil byla zde vyšší a vznikalo více tepla v místě obrábění. Vyhodnocení experimentální činnosti bylo rovněž zaměřeno na tvorbu třísek, opotřebení a trvanlivost řezných nástrojů a na vybrané parametry integrity povrchu. Obrábění proběhlo za předem určených podmínek. Proces zpravování hliníkové slitiny AW-2014 byl ovlivněn celou řadou veličin, které měly vliv na stav a průběh obrábění. Z již zmíněných vlastností hliníkové slitiny jako je například velká tepelná roztažnost (deformace obrobku). Pozornost byla potřeba věnovat i problematice utváření třísky.

### 5.1 Tvorba a tvarování třísky

Při třískovém obrábění vniká ostří nástroje do obráběného materiálu. Odřezávaná vrstva je namáhána a deformována. Velikost namáhání a deformací obráběné vrstvy záleží na druhu a vlastnostech obráběného materiálu. K deformacím vždy dojde v primární oblasti  $OMN$ , v sekundární oblasti na čele řezného nástroje a částečně v terciární oblasti hřbetem nástroje. [40]









Obr. 5.1 Oblasti plastických deformací v místě obrábění [40]




Účinkem plastických deformací se může měnit průřez odřezávané vrstvy. Průřez třísky se proti průřezu odřezávané vrstvy zvětšuje, délka třísky je menší než délka odebírané vrstvy. Tento jev se nazývá pýchování třísky. Odebrané třísky mohou vykazovat poměrně velký objem, díky tomuto se musí volit takové podmínky obrábění, aby výsledný objemový součinitel třísek  $K_{Vo}$  byl co nejmenší. Celkovou hodnotu lze zmenšit volbou vhodného materiálu, změnou geometrie řezného nástroje a řezných podmínek, v neposlední řadě použitím utvařeče třísek. [40]

Tvar a velikost třísek se odvíjel od řady okolností, které působily na proces obrábění. Nejdůležitější z nich byly vlastnosti opracovávaného materiálu, geometrie a materiál nástroje, v neposlední řadě řezné podmínky.

Tab. 5.1 Třísky při obrábění hliníkové slitiny AW-2014 ( $f = 0,2 \text{ mm}$ )

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0\text{--}5\ \mu\text{m}$		
Řezné podmínky	$i = 1$	$i = 4$
$v_c = 1000\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$		
$f = 0,2\ \text{mm}$		
$a_p = 2\ \text{mm}$		
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$		
Řezné podmínky	$i = 1$	$i = 4$
$v_c = 1000\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$		
$f = 0,2\ \text{mm}$		
$a_p = 2\ \text{mm}$		
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$		
Řezné podmínky	$i = 1$	$i = 4$
$v_c = 1000\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$		
$f = 0,2\ \text{mm}$		
$a_p = 2\ \text{mm}$		

Tab. 5.2 Třísky při obrábění hliníkové slitiny AW-2014 ( $f = 0,4 \text{ mm}$ )

Řezné podmínky	Zaoblení břitu: $r_n = 0-5 \mu\text{m}$	Zaoblení břitu: $r_n = 10-15 \mu\text{m}$
	$i = 1$	$i = 1$
$v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$		
$f = 0,4 \text{ mm}$		
$a_p = 2 \text{ mm}$		
Řezné podmínky	Zaoblení břitu: $r_n = 20-25 \mu\text{m}$	
	$i = 1$	
$v_c = 1000 \text{ m.min}^{-1}$		
$f = 0,4 \text{ mm}$		
$a_p = 2 \text{ mm}$		

Při obrábění zaobleným břitem  $r_n = 0-5 \mu\text{m}$  se neprojevovalo skoro žádné opotřebení ostří a při posledním úběru se tvořila vinutá smotaná tříska. Rozdíl bylo možno pozorovat u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 10-15 \mu\text{m}$ . Při posledním úběru materiálu si lze všimnout dělené obloukovité třísky. U největšího poloměru zaoblení břitu  $r_n = 20-25 \mu\text{m}$  se utvářela dlouhá stužková tříska již u neopotřebované vyměnitelné břitové destičky. Při obrábění s posuvem  $f = 0,4 \text{ mm}$  se vytvářela podobná tříska (vinutá smotaná), stejně jako ve většině případů. Zvýšený posuv u VBD s poloměrem zaoblením špičky  $r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$  měl spíše vliv na drsnost obrobené plochy.

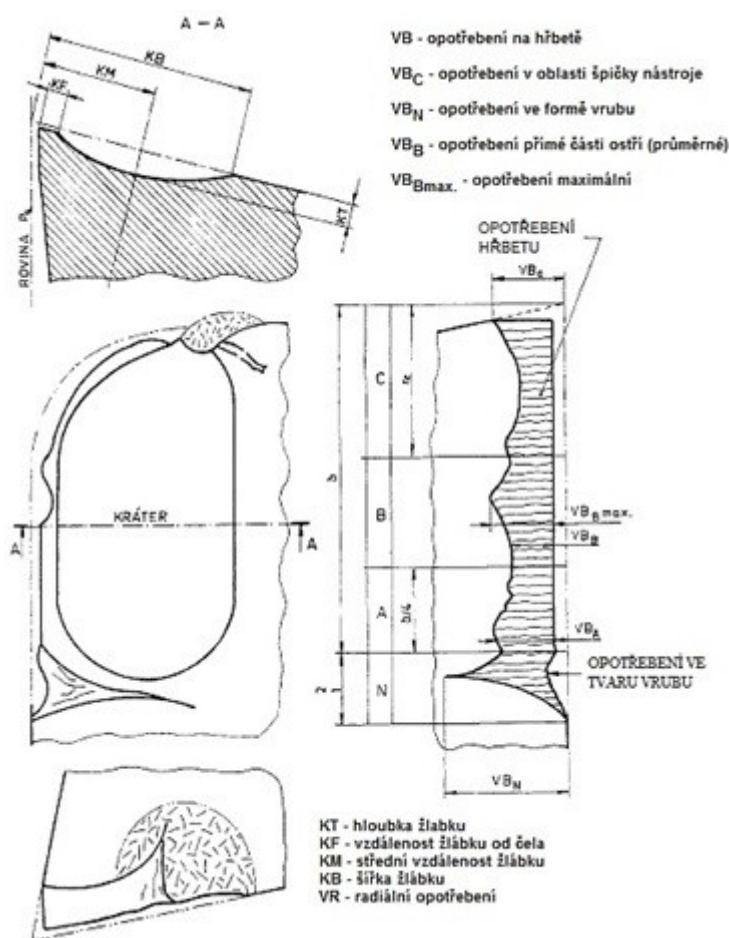
## 5.2 Opotřebení a trvanlivost řezného nástroje

Opotřebení je proces, při kterém se zvětšuje poloměr zaoblení břitu, zhoršuje se drsnost plochy čela (hřbetu) a dojde ke změně geometrie ostří. K opotřebení dojde u materiálů, které jsou v kontaktu nebo vzájemném pohybu. Jako typický příklad je možno uvést třískové obrábění. Při opracování hliníkové slitiny působily na ostří řezného nástroje různé zatěžující vlivy. Jsou projevem chemických, mechanických vlastností a abrazivního účinku. Důsledkem zatěžování ostří byl vznik opotřebení nástroje. Důvody konečné trvanlivosti nástroje mohou být různé, avšak nejčastěji to jsou špatně zvolené řezné podmínky.



### 5.2.1 Kritéria opotřebení řezného nástroje

Typ opotřebení, který může způsobit nejdříve konec užitečné trvanlivosti nástroje, se má počít jako hlavní kritérium při výběru kritérií trvanlivosti. Typ a hodnota se musí zaznamenat. Jak není možné stanovit převládající typ opotřebení, je možné použít další typy kritérií. Pro vyhodnocení opotřebení řezných nástrojů se používá norma ISO 3685: 1993. Tato mezinárodní norma je určena pro zkoušky trvanlivosti při soustružení součástí nástroji z rychlořezné oceli, slinutého karbidu a keramiky určeným břitem nástroje. Může se používat v laboratorních podmínkách i ve výrobní praxi. Norma platí výhradně pro podmínky, při kterých je kritérium trvanlivosti opotřebení nástroje. [12]



Obr. 5.2 Typy opotřebení na řezném nástroji dle normy ISO 3685 [12]

### 5.2.2 Vyhodnocení opotřebení ostří řezného nástroje

Otupování ostří a studium opotřebení řezného nástroje je základem pro určení empirických údajů pro optimalizaci řezných parametrů, respektive trvanlivosti břitu. Stav výsledného obrobku může plně záviset na stavu samotného řezného nástroje, proto je potřeba se zaměřit na monitorizaci a měření opotřebení nástroje. [41]

Měření opotřebení lze provádět pomocí přímé a nepřímé metody měření opotřebení. Pro vyhodnocení experimentální činnosti byla použita přímá mikroskopická metoda měření. Tuto metodu bylo těžké realizovat v důsledku toho, že otupující plochy byly nedostupné pro měřicí přístroje. Z toho důvodu bylo nutné obrábění přerušit, vyjmout vyměnitelnou břitovou destičku z držáku a samotné měření opotřebení provést pomocí dílenského mikroskopu. Přerušování obrábění značně ovlivňovalo charakter otupění v dalších etapách experimentu. Důvodem je vyjmutí nástroje z nožového držáku a to přinášelo změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení.

Vyhodnocení velikosti opotřebení ostří proběhlo dle normy ISO3685: 1993. Jako kritérium opotřebení bylo zvoleno maximální opotřebení na hlavním hřbetu  $VB_{Bmax}$  a vzdálenost žlábků od čela  $KF$ . Díky velké hloubce řezu  $a_p$  lze technologii obrábění hliníkové slitiny označit za hrubování. Po obrobení plochy byla vyměnitelná břitová destička sledována pomocí dílenského mikroskopu s křížovým stolem. Velikosti opotřebení byly určeny přímým měřením lineárních rozměrů. Jednotlivé snímky opotřebení byly pořízeny binokulárním stereomikroskopem, který je vybaven digitální kamerou. Dále tyto snímky byly převedeny do počítače a zpracovány v programu Motic Images Plus 2.0.



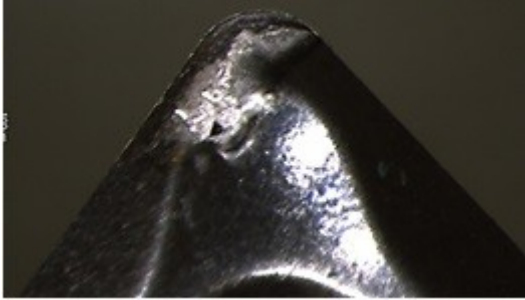
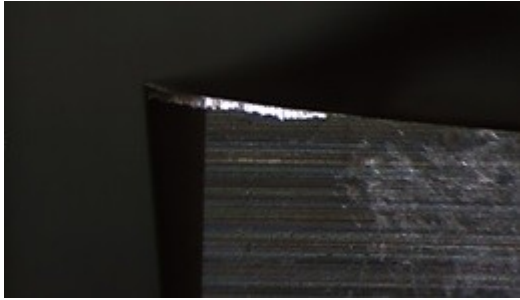
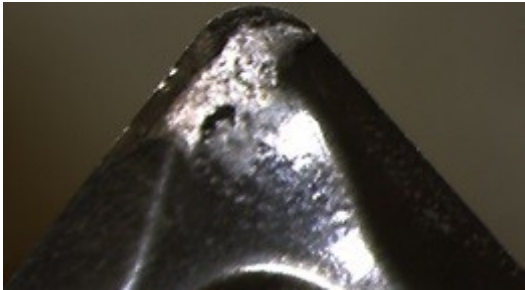
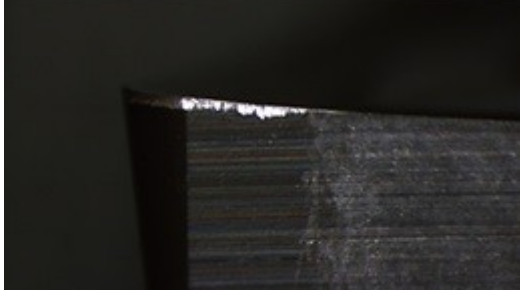
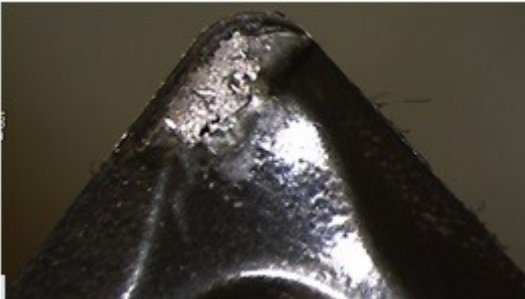

*Obr. 5.3 Dílenský mikroskop s křížovým stolem*

V tabulce 5.3 jsou uvedeny fotografie opotřebeného břitu nástroje pro všechny zaoblení ostří, které byly pořízeny dílenským mikroskopem s křížovým stolem. Opotřebení bylo sledováno na ploše hlavního hřbetu  $A_\alpha$ , a na ploše čela  $A_\gamma$ . Měření vzdálenosti žlábků od čela  $KF$  nebylo možno provést z důvodu tvoření nárůstku na čele řezného nástroje.


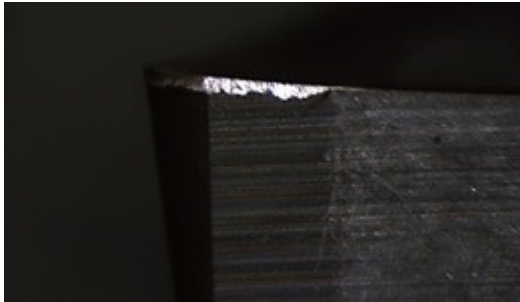


Obr. 5.4 Měření opotřebení na čele a hřbetě nástroje

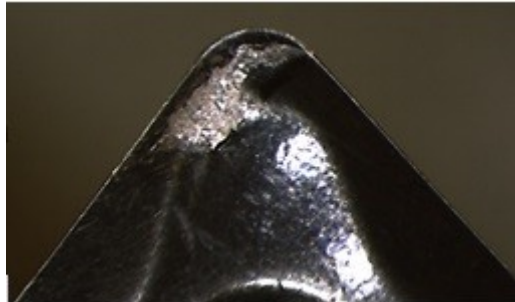



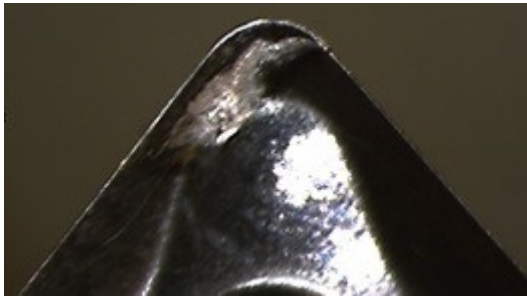
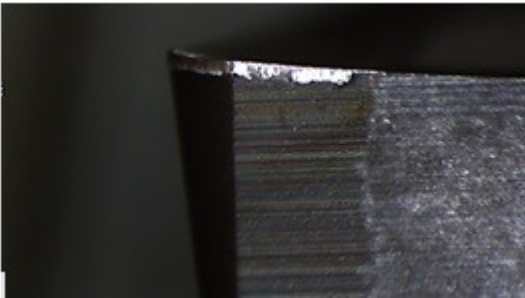
Tab. 5.3 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 0-5 \mu\text{m}$  ( $f = 0,2 \text{ mm}$ )


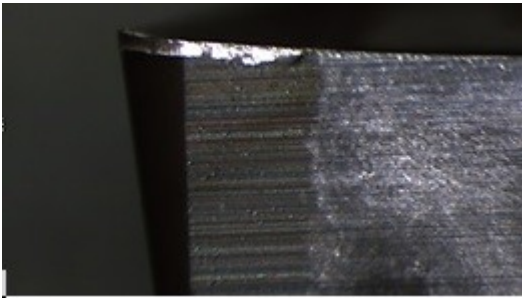
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0-5 \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ]	-	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	1,2
	Q [ $\text{cm}^3$ ]	177	t <sub>As</sub> [min]	0,4
				
$i = 2$	KF [ $\mu\text{m}$ ]	-	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	1,4
	Q [ $\text{cm}^3$ ]	344	t <sub>As</sub> [min]	0,9
				
$i = 3$	KF [ $\mu\text{m}$ ]	-	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	1,7
	Q [ $\text{cm}^3$ ]	500	t <sub>As</sub> [min]	1,3
				



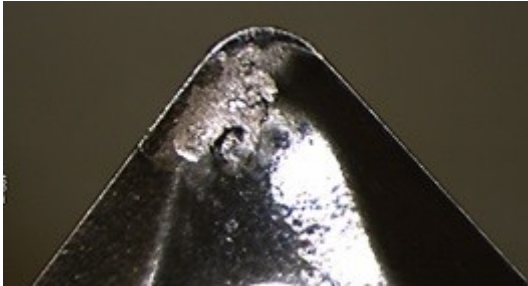
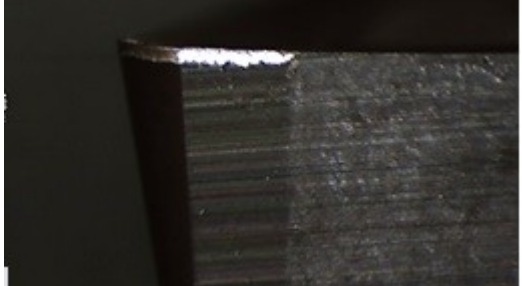
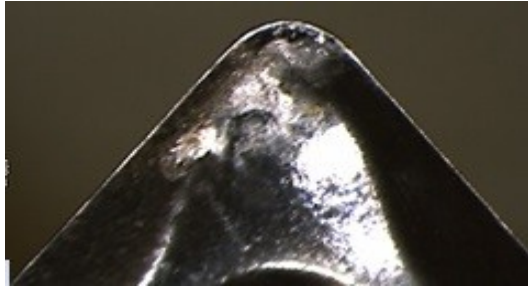
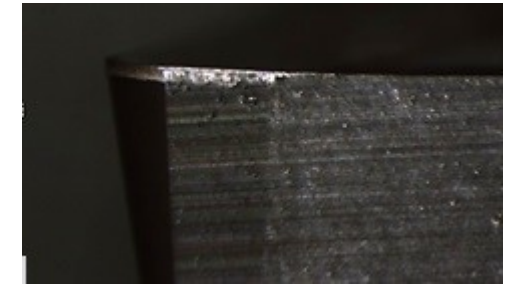

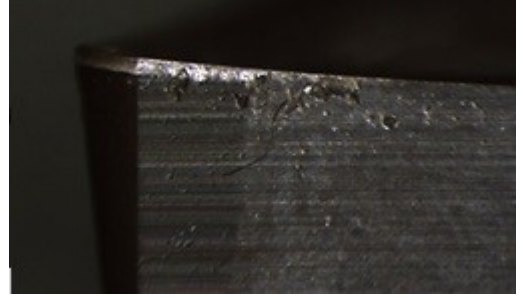
$i = 4$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 647	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,8 1,6
				


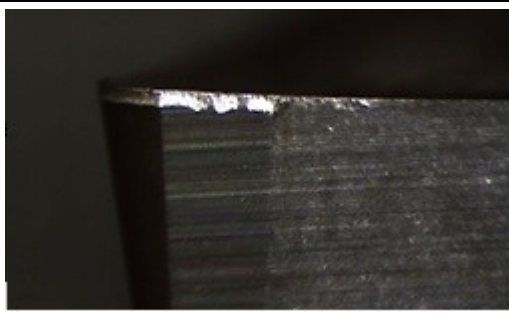
Tab. 5.4 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$  ( $f = 0,2\ \text{mm}$ )

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 157	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,2 0,4
				
$i = 2$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 303	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,7 0,8
				
$i = 3$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 439	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,8 1,1
				

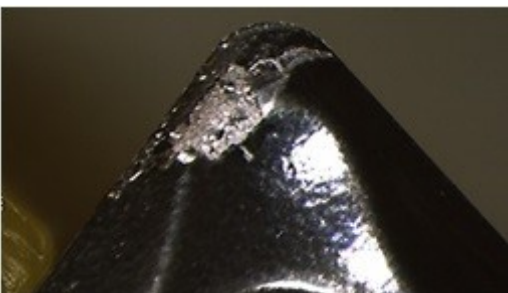

$i = 4$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 566	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	2,2 1,4
				

Tab. 5.5 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$  ( $f = 0,2\ \text{mm}$ )

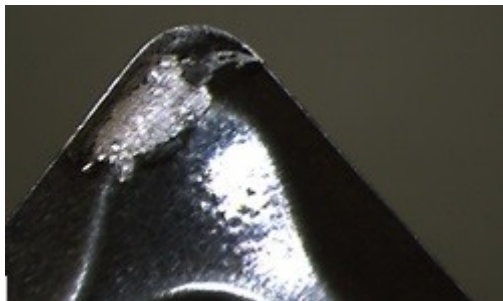

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 136	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,7 0,3
				
$i = 2$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 263	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,8 0,7
				
$i = 3$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 379	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,9 1,0
				

$i = 4$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 485	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	2,1 1,2
				

Tab. 5.6 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 0\text{--}5\ \mu\text{m}$  ( $f = 0,4\ \text{mm}$ )

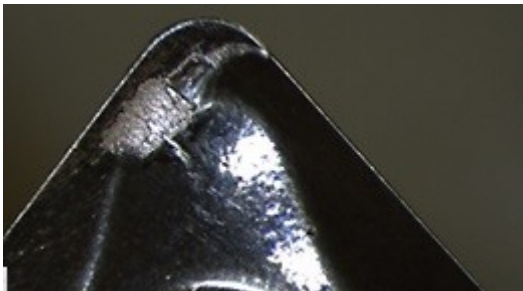
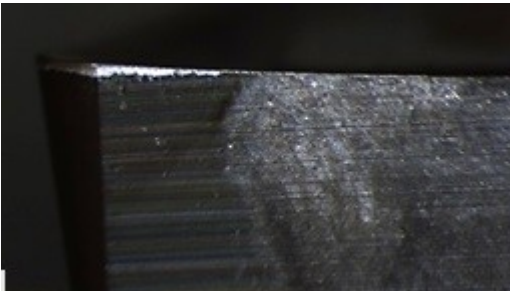
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0\text{--}5\ \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 177	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	0,8 0,2
				

Tab. 5.7 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$  ( $f = 0,4\ \text{mm}$ )

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	- 172	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,2 0,2
				



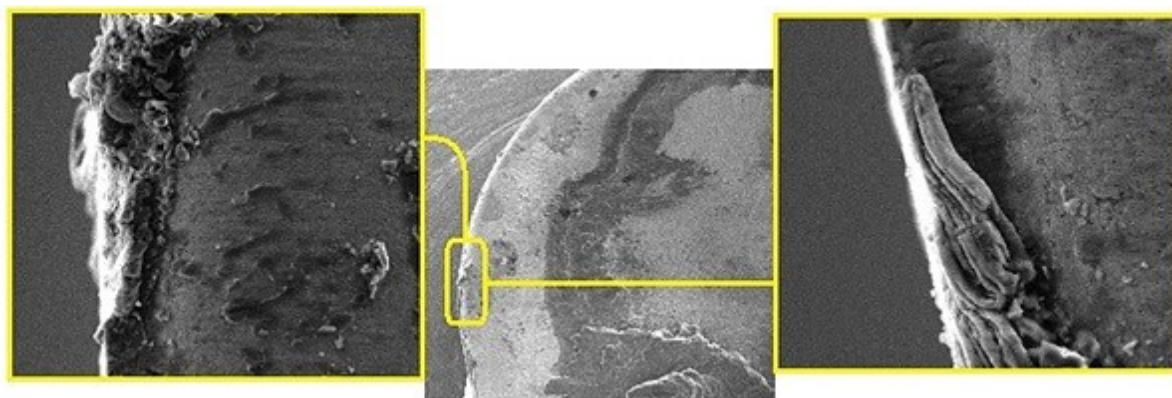
Tab. 5.8 Průběh opotřebení u poloměru zaoblení ostří  $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$  ( $f = 0,4\ \text{mm}$ )

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$				
Plocha čela $A_\gamma$			Plocha hlavního hřbetu $A_\alpha$	
$i = 1$	KF [ $\mu\text{m}$ ] Q [ $\text{cm}^3$ ]	167	VB <sub>Bmax</sub> [ $\mu\text{m}$ ] t <sub>As</sub> [min]	1,4 0,2
				

### 5.2.3 Stanovení mechanismů opotřebení řezného nástroje

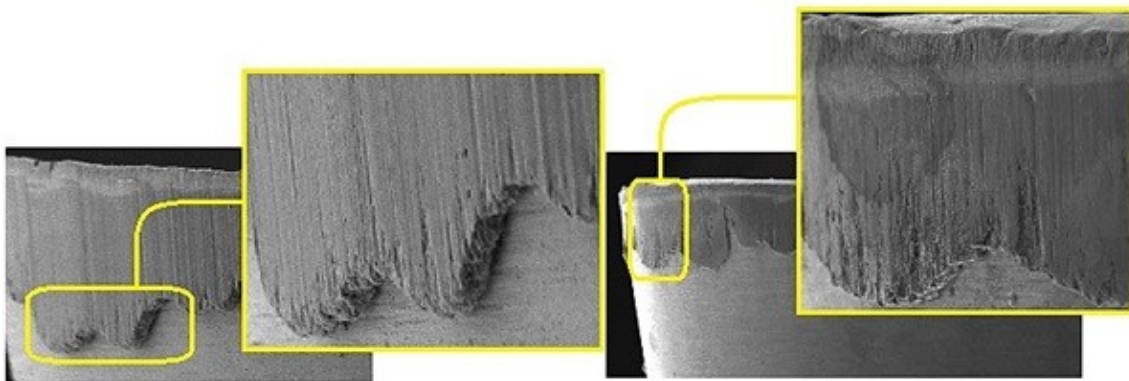
Obsah železa v hliníkové slitině ovlivňoval do značné míry velikost opotřebení nástroje. Opotřebení řezného nástroje bylo signalizováno změnou tvaru odcházející třísky. U stanovení mechanismů opotřebení bylo využito několikanásobného zvětšení obrazu. Při opotřebení a destrukci břitu se začal vytvářet nárůstek na čele i hřbetu  $VBD$ , a tím docházelo ke změně koeficientu tření mezi obrobkem a ostřím nástroje. Díky zvýšenému koeficientu tření se přivedlo do místa řezu více tepla, což výrazně ovlivnilo oblast ostří řezného nástroje. Tyto změny měly vliv na kvalitu plochy obrobce.

Hlavní příčinou vzniku nárůstku je adheze materiálu. Tvorbu nárůstku lze nejčastěji spojovat zejména s působením vysokého tlaku. Vznik je soustředěn tam, kde je zvýšená chemická afinita, vysoký tlak a teplota v zóně řezu. Následně dojde k lomu nárůstku, s kterým se odlamuje i částice materiálu břitové destičky, důsledkem toho je destrukce břitu a rychlejší opotřebení ostří. [42]



Obr. 5.5 Detail opotřebení břitu nástroje (zvětšeno 1500x a 3000x)

Při obrábění hliníkové slitiny bylo zaznamenáno v kontaktní zóně nalepování materiálu na hřbet řezného nástroje. Oblast nalepování materiálu postupem času přecházela i na čelní plochu. Intenzivnější nalepování materiálu lze ovšem vidět na hřbetě řezného nástroje. Tento jev je způsoben několika faktory, mezi které se řadí například nevhodně zvolený režim chlazení a povlak řezného nástroje, nebo málo pozitivní geometrie břitu.

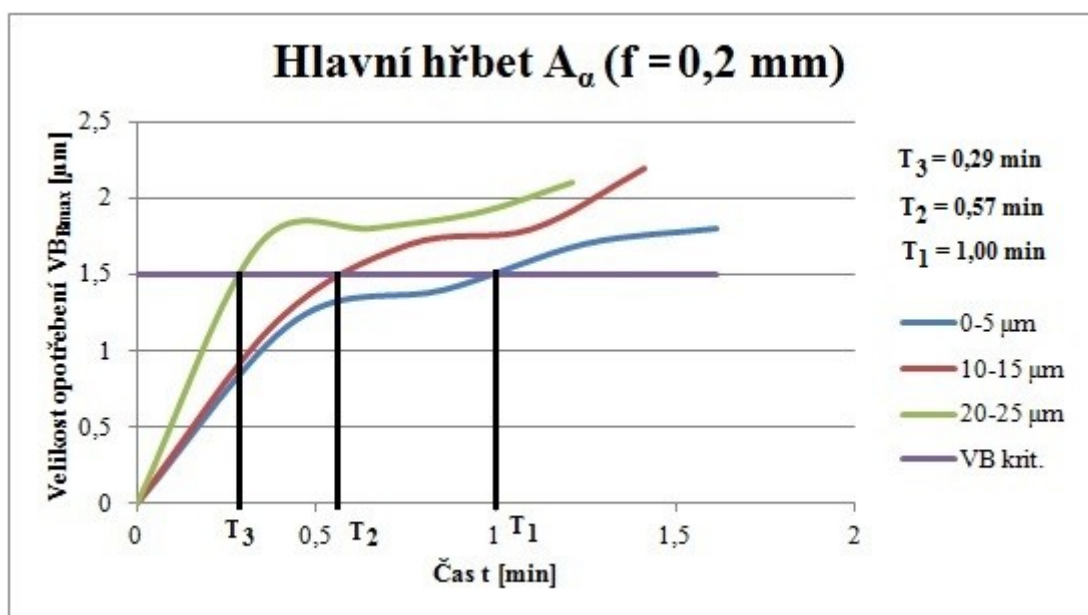


*Obr. 5.6 Detail nalepování materiálu na břitu řezného nástroje*

#### **5.2.4 Vliv opotřebení na trvanlivost řezného nástroje**

Největší vliv na trvanlivost řezného nástroje má, z řezných podmínek, řezná rychlost. Byl odvozen základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin dle vzorců 1.1 a 1.2. Při obrábění hliníkové slitiny AW-2014 se sledoval nárůst opotřebení řezného nástroje. Kritériem se stalo opotřebení na hlavním hřbetu  $A_a$ . Po sestrojení závislosti, viz graf 5.1, se stanovily hodnoty trvanlivostí pro předem určenou hodnotu opotřebení  $VB_{krit.} = 1,5 \mu\text{m}$ . Hodnota opotřebení  $VB_{krit.}$  je obecně vyšší. Z důvodu nízkého opotřebení nástroje musela být tato hodnota upravena pro provedenou experimentální činnost.

Vlivem tření odcházející třísky byla zoxidovaná vrstva čela řezného nástroje setřena a působením vysokých tlaků v místě styku třísky s čelem řezného nástroje a vysoké teploty třísky byly aplikovány adhezní síly. V místě styku pak došlo k navaření třísky k čelu řezného nástroje. Část třísky zůstala navařena na čele a tvořil se nárůstek, který je možno vyznačovat na čele i hřbetu řezného nástroje. Vyznačuje se vysokou pevností a tvrdostí, v některých případech mohl převzít funkci ostří řezného nástroje. Nárůstkem lze nástroj chránit před opotřebením, ale v okamžiku porušení stabilní části značně poškodil nástroj. V konečném důsledku lze považovat jeho vlivy za nežádoucí. Mezi nežádoucí jevy je možno zařadit také změnu geometrie řezného nástroje a rozměrů obráběné součásti a mohl způsobit samobuzené kmitání soustavy. Vzniku nárůstku bylo možno zabránit změnou řezných podmínek, použitím vyhovujících procesních kapalin (v experimentální části 8 %) s vysokým účinkem mazání.



Graf 5.1 Průběh opotřebení hlavního hřbetu  $A_\alpha$  nástroje při posuvu  $f = 0,2$  mm

U všech VBD s různým zaoblením ostří docházelo k tvorbě nárůstku na čele i hřbetu řezného nástroje. Z naměřených hodnot opotřebení je patrné, že se vzrůstajícím časem použití řezného nástroje při obrábění, roste opotřebení. Nejdelší trvanlivosti bylo dosaženo u poloměru zaoblení bříty  $r_n = 0-5 \mu m$  v době 1 minuty. Výraznější opotřebení lze vyzorovat na hlavním hřbetu nástroje s poloměrem zaoblení bříty  $r_n = 20-25 \mu m$ . Intenzita opotřebení a trvanlivost bříty posuzovaných nástrojů byla v podstatě závislá na schopnosti tenké povrchové vrstvy chránit materiál substrátu před teplotním a mechanickým účinkem odcházející třísky. Rovněž je všeobecně známo, že opotřebení bříty nástroje vede ve většině případů ke zvýšení síly řezání a celkové energie procesu obrábění.

### 5.3 Parametr integrity povrchu

Z pohledu výroby má největší význam znalost mechanismu tvorby nového povrchu, protože přispěje lépe pochopit povahu a vlastnosti obrobeného povrchu, případně umožňuje vytvořit obrobené plochy součásti bez poruch. Při obrábění mohou nastat změny v povrchové vrstvě obrobku, které lze posuzovat jako změnu jakosti. Tyto změny se mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a lze je využít pro hodnocení její integrity. Integrity povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká. V úvahu se berou důsledky působení technologických operací na jakost opracované plochy a lze je dávat do vztahů k funkčním požadavkům na celý výrobek. [43]

Při obrábění je potřeba neustále měřit a vyhodnocovat drsnost obrobeného povrchu, která je nejdůležitější pro zajištění správné funkce obrobené součásti. Drsnost povrchu

je tedy souhrn nerovností povrchu s poměrně malou vzdáleností, které se vytvářejí při obrábění nebo jejím vlivem. Do drsnosti povrchu se nezapočítávají vady, které se mohou vyskytovat jen ojediněle a vznikat vadami materiálu. Drsnost povrchu je dána způsobem obrábění, vzhledem a hloubkou stop, které na obrobeném povrchu zanechává řezný nástroj.

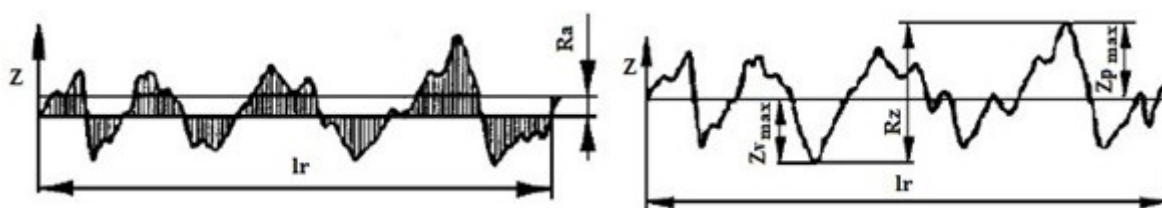
### 5.3.1 Stanovení vybraných parametrů drsnosti povrchu

Při obrábění jsou kladeny na povrch nejen požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost, ale také na jakost obrobeného povrchu. Správně zvolená jakost povrchu zajišťuje dlouhou životnost součásti. Ke zbytečnému zvyšování výrobních nákladů pak vede nevhodně zvolená drsnost. Drsnost povrchu je tedy nejčastěji označována za jakost obrobeného povrchu. Jedná se o souhrn nerovností skutečného povrchu obrobku na určitém úseku. Tyto nerovnosti jsou měřeny jako úchyly zjištěného profilu od vztažné čáry. [44]

Měření parametrů drsnosti a následné vyhodnocení bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 4287. Předmětem této normy je stanovení termínů, definic a parametrů pro určování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. V experimentální činnosti byly zvoleny dva parametry drsnosti povrchu, průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$  a největší výška profilu  $R_z$ : [13]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (5.1)$$

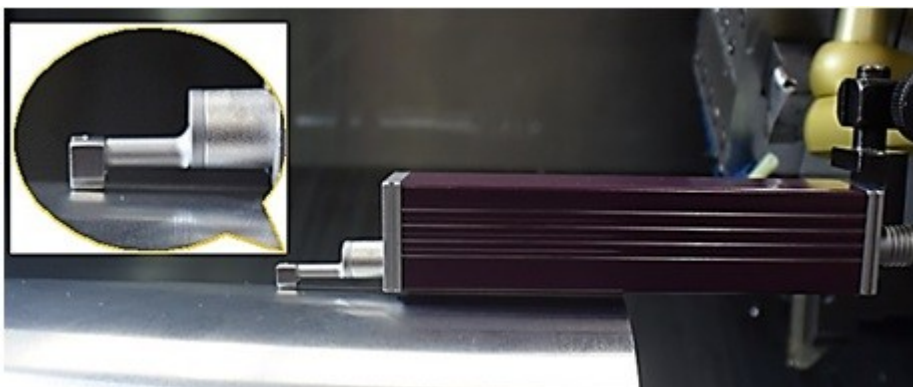
$$R_z = Z_{p\max} + Z_{v\max} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.2)$$



Obr. 5.7 Parametry drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  [14]

Měření vybraných parametrů drsnosti bylo provedeno přímo na obráběcím stroji rovnoběžně s osou obrobku. Po obrobení plochy byl ke stroji připevněn dotykový měřicí přístroj SurfTest SJ-210 od firmy Mitutoyo. Tento přístroj se používá k měření charakteristik drsnosti povrchu. Drsnost byla měřena snímacím hrotem, který byl vybaven diamantovým hrotem. Poloměr zaoblení špičky hrotu byl  $2 \mu\text{m}$ , vrcholový úhel kužele  $60^\circ$  a měření probíhalo při přítlačné síle  $0,75 \text{ mN}$ . Celkové určení parametrů drsnosti bylo velmi jednoduché a rychlé.





Obr. 5.8 Ukázka měření drsnosti

Výstup měřené veličiny je proveden na displej měřicího přístroje. Mezní vlnová délka  $\lambda_C = 0,8 \text{ mm}$  a vyhodnocovaná délka profilu  $l_n = 4 \text{ mm}$ . Samotné měření proběhlo vždy po prvním a čtvrtém úběru materiálu u všech VBD s různým zaoblením ostří. Na opracovaném materiálu bylo naměřeno 5 hodnot parametrů drsnosti  $R_a$  a  $R_z$ , v místech na ploše obráběné součásti, který byl vždy pootočen o  $120^\circ$ .



Obr. 5.9 Měřicí přístroj Surftest SJ - 210

Získané parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  byly postupně odečítány z displeje měřicího přístroje. Výsledné hodnoty byly zpracovány dle následujících vzorců a uvedeny to tabulek. Vzhledem k velkému množství hodnot je zde uveden vzorový výpočet nejistoty měření pro poloměr zaoblení ostří  $r_n = 0\text{-}5 \text{ μm}$  a výsledné hodnoty zaznamenány do tabulky 5.9.

Výběrový průměr: [14]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [\mu\text{m}] \quad (5.3)$$



Výběrová směrodatná odchylka: [14]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.4)$$

Standardní nejistota typu A: [14]

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.5)$$

Výsledná standardní nejistota typu A ( $k_s = 1,4$  pro  $n = 5$ ): [14]

$$u_{Ak} = s(\bar{x}) \cdot k_s \quad [\mu\text{m}]$$

Rozšířená nejistota ( $k_U = 2$ , pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%): [14]

$$U = u_A \cdot k_U \quad [\mu\text{m}] \quad (5.6)$$

Standardní nejistota typu B: [14]

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad [\mu\text{m}]$$

Hodnota nejistoty vlivu opěrné patky snímacího hrotu: [14]

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{\sqrt{3}} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.7)$$

Hodnota nejistoty měřicího přístroje: [14]

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 \quad [\mu\text{m}]$$

Výpočet kombinované standardní nejistoty: [14]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.8)$$

Výpočet rozšířené kombinované nejistoty ( $k_U = 2$ , pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%): [14]

$$U_C = u_C \cdot k_U \quad [\mu\text{m}] \quad (5.9)$$

Tab. 5.9 Zpracování naměřených hodnot vybraných parametrů drsnosti ( $f=0,2\text{ mm}$ )

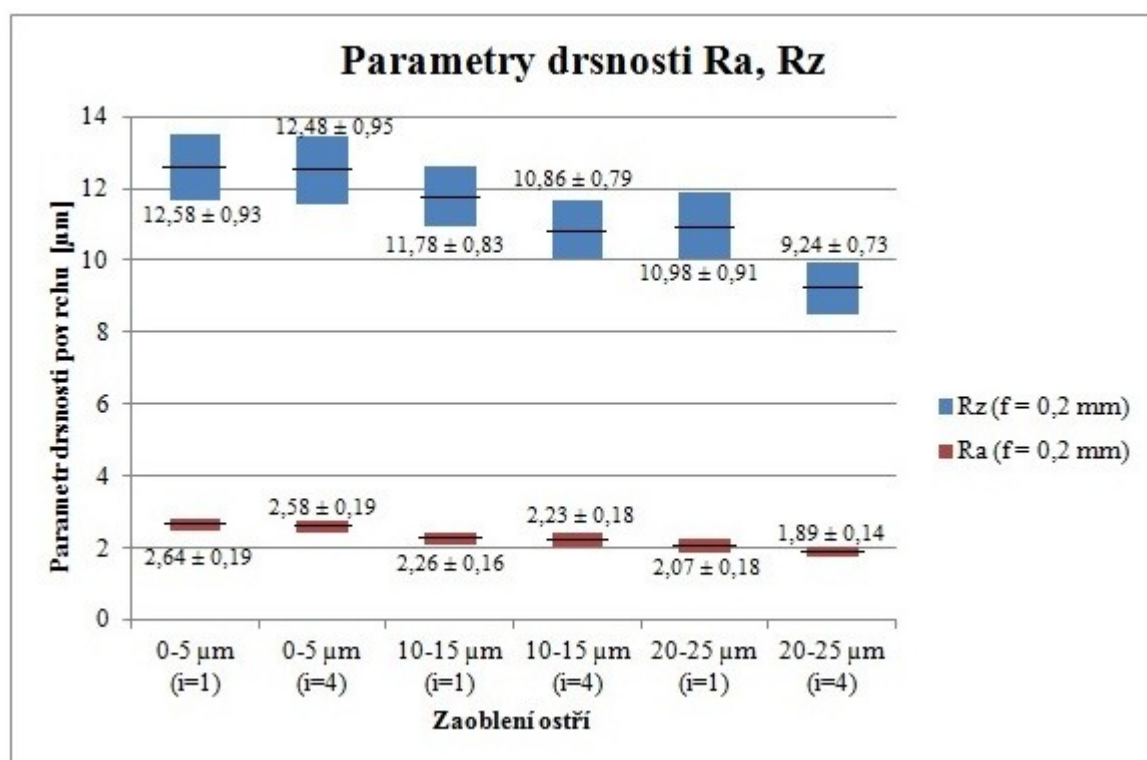
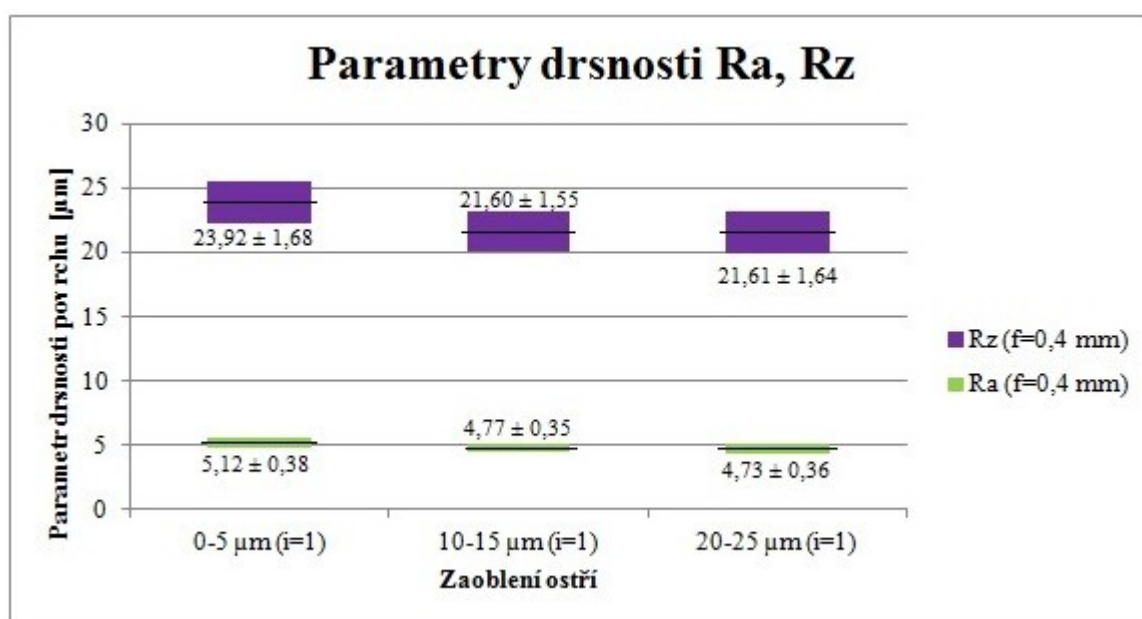
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0-5\text{ }\mu\text{m}$ ( $i = 1$ )											
č.	$x_i$	Ra [ $\mu\text{m}$ ]				č.		Rz [ $\mu\text{m}$ ]			
1)	2,67	$\bar{x}$	2,64	$u_{B1}$	0,05	1)	12,83	$\bar{x}$	12,58	$u_{B1}$	0,22
2)	2,65	$s(x)$	0,04	$u_{B2}$	0,08	2)	12,28	$s(x)$	0,27	$u_{B2}$	0,38
3)	2,68	$u_A$	0,02	$u_B$	0,09	3)	12,86	$u_A$	0,12	$u_B$	0,44
4)	2,62	$u_{Ak}$	0,02	$u_C$	0,10	4)	12,35	$u_{Ak}$	0,17	$u_C$	0,47
5)	2,59	$U$	0,05	$U_C$	0,19	5)	12,57	$U$	0,33	$U_C$	0,93
$\Sigma$	13,21					$\Sigma$	62,89				
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0-5\text{ }\mu\text{m}$ ( $i = 4$ )											
č.	$x_i$	Ra [ $\mu\text{m}$ ]				č.		Rz [ $\mu\text{m}$ ]			
1)	2,64	$\bar{x}$	2,58	$u_{B1}$	0,05	1)	12,94	$\bar{x}$	12,49	$u_{B1}$	0,22
2)	2,57	$s(x)$	0,05	$u_{B2}$	0,08	2)	12,70	$s(x)$	0,32	$u_{B2}$	0,38
3)	2,57	$u_A$	0,02	$u_B$	0,09	3)	12,21	$u_A$	0,14	$u_B$	0,43
4)	2,53	$u_{Ak}$	0,03	$u_C$	0,09	4)	12,34	$u_{Ak}$	0,20	$u_C$	0,48
5)	2,61	$U$	0,06	$U_C$	0,19	5)	12,26	$U$	0,39	$U_C$	0,95
$\Sigma$	12,92					$\Sigma$	62,44				

V tabulce 5.10 je zaznamenán konečný zápis výsledků vybraných parametrů drsnosti, průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu  $Ra$  a největší výšky profilu  $Rz$ .

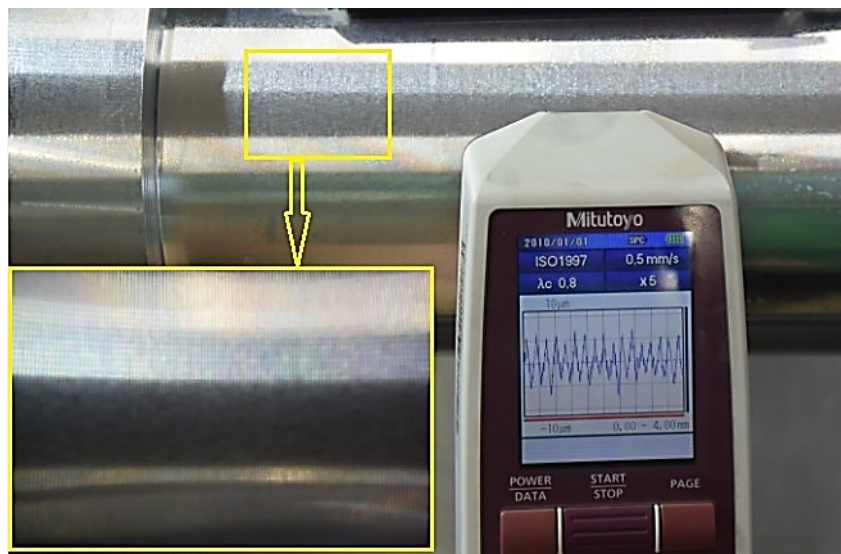
Tab. 5.10 Konečný zápis výsledků vybraných parametrů drsnosti

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0-5\text{ }\mu\text{m}$		
<b>f = 0,2 mm</b>	$Ra = (\bar{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$Rz = (\bar{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
<b>i = 1</b>	$2,64 \pm 0,19$	$12,58 \pm 0,93$
<b>i = 4</b>	$2,58 \pm 0,19$	$12,48 \pm 0,95$
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 10-15\text{ }\mu\text{m}$		
<b>f = 0,2 mm</b>	$Ra = (\bar{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$Rz = (\bar{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
<b>i = 1</b>	$2,26 \pm 0,16$	$11,78 \pm 0,83$
<b>i = 4</b>	$2,23 \pm 0,18$	$10,86 \pm 0,79$
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 20-25\text{ }\mu\text{m}$		
<b>f = 0,2 mm</b>	$Ra = (\bar{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$Rz = (\bar{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
<b>i = 1</b>	$2,07 \pm 0,18$	$10,98 \pm 0,91$
<b>i = 4</b>	$1,89 \pm 0,14$	$9,24 \pm 0,73$
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 0-5\text{ }\mu\text{m}$		
<b>f = 0,4 mm</b>	$Ra = (\bar{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$Rz = (\bar{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
<b>i = 1</b>	$5,12 \pm 0,38$	$23,92 \pm 1,68$

Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 10\text{--}15\ \mu\text{m}$		
$f = 0,4\ \text{mm}$	$R_a = (\overline{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$R_z = (\overline{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
$i = 1$	$4,77 \pm 0,35$	$21,60 \pm 1,55$
Poloměr zaoblení břitu: $r_n = 20\text{--}25\ \mu\text{m}$		
$f = 0,4\ \text{mm}$	$R_a = (\overline{Ra} \pm U_C) [\mu\text{m}]$	$R_z = (\overline{Rz} \pm U_C) [\mu\text{m}]$
$i = 1$	$4,73 \pm 0,36$	$21,61 \pm 1,64$

Graf 5.2 Zápis výsledků parametrů drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  pro různé zaoblení břitu ( $f = 0,2\ \text{mm}$ )Graf 5.3 Zápis výsledků parametrů drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  pro různé zaoblení břitu ( $f = 0,4\ \text{mm}$ )

Naměřené hodnoty parametrů drsnosti opracovaného povrchu byly závislé na opotřebení řezných nástrojů a stabilitě obrábění hliníkové slitiny. Z vypočtených hodnot v tabulce 5.10 a vynesných grafů 5.2, 5.3 lze jednoznačně určit, že vyměnitelné břitové destičky s poloměrem zaoblením břitu  $r_n = 20\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$  dosahovaly nejlepších výsledných parametrů drsnosti průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu  $R_a$  a největší výšky profilu  $R_z$ . Z grafů lze vypočítat, že změna posuvu měla zásadní vliv na drsnost obroběného povrchu. Naměřené hodnoty posuvu  $f = 0,4\text{ mm}$  byly poměrně vysoké.



Obr. 5.10 Zkoumání drsnosti povrchu po obrábění

## ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Cílem diplomové práce bylo pozorovat vliv zaoblení ostří na průběh opotřebení a trvanlivost řezného nástroje. Dílčím záměrem experimentu bylo vyhodnotit vybrané parametry integrity obrobeného povrchu. Nejprve byla provedena volba obráběného materiálu. Experimentální činnost byla zaměřena na opracování hliníkové slitiny AW-2014 na obráběcím stroji DGM MORI NLX2500/700, který je umístěn v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vliv na opotřebení a trvanlivost nástroje byl posuzován u poloměru zaoblení břitu  $r_n = 0\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $r_n = 10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$  a  $r_n = 20\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ . Volba řezných podmínek vycházela z doporučených hodnot výrobce řezných nástrojů. Při nižších řezných rychlostech by *VBD* nemusely vykazovat známky opotřebení, tudíž byla zvolena řezná rychlost  $v_c = 1000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . V další části experimentální činnosti byla navržena vyšší řezná rychlost, ale obrábění nebylo možné realizovat z důvodu omezení otáček použitého stroje. Pro porovnání dosažených výsledků byla tedy provedena změna posuvu z  $f = 0,2\text{ mm}$  na  $f = 0,4\text{ mm}$  při stejné řezné rychlosti  $v_c$ . Hloubka řezu byla po celou dobu experimentu konstantní  $a_p = 2\text{ mm}$ .

Tvorba a tvarování třísky je všeobecně známý problém, tudíž není od věci při obrábění materiálu samotná studie této záležitosti. Z experimentální činnosti lze vyzorovat, že se tvořila u posuzovaného zaoblení ostří vždy skoro stejná tříska. U ostrého břitu docházelo k lámání třísek. Naopak u největšího poloměru zaoblení ostří se tvořila plynulá tříska, kdy docházelo k namotání na nástroj. Tento aspekt mohl negativně ovlivnit celkový proces obrábění. Vysoká tepelná vodivost slitiny způsobila, že se teplo vygenerované v zóně řezání dobře odvádělo třískou a nekoncentrovalo se v místě obrábění.

Při hodnocení opotřebení, analýze mechanismů a následném vlivu na opotřebení řezného nástroje bylo využito zvětšeného obrazu ostří pomocí dílenského mikroskopu s křížovým stolem. Větší zvětšení bylo provedeno pomocí řádkového elektronového mikroskopu. Při obrábění výhradně docházelo k nalepování vrstev obráběného materiálu na ostří řezného nástroje. Díky zvětšenému obrazu bylo možné vyzorovat na *VBD* tvorbu nárůstku, kdy obvykle dojde ke změně geometrie nástroje. Přes ulpívající nárůstek na břitu řezného nástroje nebylo možné změřit formu opotřebení *KF* (vzdálenost žlábků od čela) dle normy ISO 3685. Vyměnitelné břitové destičky s ostrým břitem uspokojivě plnily svou funkci při opracování hliníkové slitiny. Opotřebení ostří bylo rovnoměrné a k tvorbě malého nárůstku docházelo na konci břitu, v místě odchodu třísky. Velikost nárůstku se zvětšovala s velikostí zaoblení ostří. Břit s větším poloměrem zaoblení se vyznačoval vysokou

pevností, zároveň se ale zvyšoval řezný odpor a tím narůstaly negativní vlivy (síla a teplota), které působily na ostří řezného nástroje. U největšího poloměru zaoblení ostří bylo možné vypořádat výraznou tvorbu nárůstku a bylo zde také naměřeno největší opotřebení řezného nástroje. Na závěr lze usoudit, že čím větší bude poloměr zaoblení ostří, tím větší bude opotřebení řezného nástroje. Stanovení řezivosti nelze pro danou experimentální činnost vykreslit.

V experimentální činnosti při obrábění hliníkové slitiny AW-2014 byly vyhodnocovány vybrané parametry integrity povrchu. Častým hodnoceným parametrem je drsnost povrchu, která ovlivňuje vlastnosti povrchů obráběných součástí. Potřebná drsnost povrchu může záviset na zvolených řezných podmínkách, volbě nástroje a řezné geometrii. Pro vyhodnocení experimentu byly zvoleny parametry drsnosti  $Ra$  a  $Rz$ . Všechny naměřené hodnoty byly zpracovány a vyneseny do grafů. Z těchto grafů lze vyčíst klesající závislost parametrů drsnosti  $Ra$  i  $Rz$  na zvyšujícím se poloměru zaoblení ostří  $VBD$ . V obou případech posuvu lze vypořádat vyšší hodnoty parametrů drsnosti. Proto lze obrábění tímto posuvem označit za hrubování.

## PODĚKOVÁNÍ

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Děkuji také svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. z Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TU Ostrava za poskytování cenných rad, konzultací a odborné řízení této práce.

## LITERATURA

- [1] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy, hutnické výrobky a jejich použití*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1957, 219 s.
- [3] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-72042-48-3.
- [4] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-70806-00-1.
- [5] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007, s. 126. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [6] KOCMAN, K. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-21430-68-0.
- [7] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ s.r.o. *Průručka obrábění: kniha pro praxe*. 1. čes. vyd. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97229-94-6.
- [8] *Indexable inserts for machining of aluminium alloys*. Šumperk: Pramet Tools, 2002.
- [9] HUMÁR, A. *Technologie I. – Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterskou formu studia*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003, s. 138.
- [10] PRAMET TOOLS, s.r.o. *Soustružení 2014: Katalog společnosti Pramet Tools*. Šumperk: Pramet Tools, s.r.o., 2014. 399 s.
- [11] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [12] ISO 3685. *Skúšanie trvanlivosti sústružníckych nástrojov s jednou reznou hranou*. Slovenský ústav technickej normalizácie, 1999.
- [13] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [14] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská -Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [15] CLARK, D. a B. ZOITOS. *Corrosion of glass, ceramics, and ceramic superconductors: principles, testing, characterization, and applications*. Park Ridge, N.J.: Noyes, c1992, xxvi, 672 p. ISBN 0815512837.



- [16] BY ERIK OBERG .. [ET AL.] a CHRISTOPHER J. MCCAULEY (ED.). Machinery's handbook. 29th ed. New York, N.Y: Industrial Press, 2012. ISBN 9780831129019.
- [17] CORTÉS RODRÍGUEZ, C. J. *Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing*. Kassel: kassel university press GmbH, 2009, 189 s. ISBN 978-3-89958-712-8.
- [18] DENKENA, B., LUCAS, A., BASSET, E. *Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermomechanical load*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, 2011, s. 73–76.
- [19] KOUNTANYA, R., ENDRES, W. J. The Effects of Corner Radius and Edge Radius on Tool Flank Wear. ASME Journal of Manufacturing Processes. Vol.8. 2002 pp. 89-96. ISSN 1526-6125.
- [20] Al.: EN AW - 2014. *Certificate of Conformity*. Hannover.
- [21] ODDĚLENÍ POVRCHOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Obrábění slitiny AlSi1Mg0,5Mn nástroji s progresivními tenkými vrstvami* [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <[http://www.ateam.zcu.cz/download/prispevek\\_Aluminium07.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/prispevek_Aluminium07.pdf)>
- [22] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem* [online]. 2016 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>>
- [23] VŠCH-T. *Stručná charakteristika hliníku a jeho slitin* [online]. Praha [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <<http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/struktur/hlinik/vlastntx.htm>>
- [24] PAGÁČ, M. KONSTRUKTÉR. *Živé ukázky obrábění sledovaly průběh řezných sil* [online]. 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <[www.konstrukter.cz/2015/05/25/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil](http://www.konstrukter.cz/2015/05/25/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil)>
- [25] EKONOMICKÁ UČEBNICE. *Tvar třísky a geometrie nástroje* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1816>>
- [26] TM TOOLS. *Destičky na obrábění hliníku* [online]. Praha [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.tmttools.cz/akce/AL%20desticky.pdf>>
- [27] IHNED.CZ. *Britové destičky pro obrábění hliníku a jeho slitin* [online]. 2005 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://ihned.cz/c1-17370090-britove-desticky-pro-obrabeni-hliniku-a-jeho-slitin>>
- [28] HAMERNÍK, J. *Základy obrábění* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>>

- [29] TUMLIKOVŮ. *Doporučené řezné podmínky nástrojů* [online]. 2011 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/rezne-podminky-nastroju/>>
- [30] KŘÍŽ, P. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Moderní trendy ve vývoji obráběcích kapalin* [online]. 2005 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-trendy-ve-vyvoji-obrabecich-kapalin>>
- [31] KŘÍŽ, P. TRIBOTECHNIKA. *Mikroemulze pro obrábění hliníku* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/mikroemulze-pro-obrabeni-hliniku.html>>
- [32] VŠCH-T. *Konstrukce soustružnického nože s VBD* [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <[http://old.fst.zcu.cz/\\_files\\_web\\_FST/\\_SP\\_FST\(SVOC\)/\\_2009/\\_sbornik/PapersPdf/Bc/Urban\\_Marek.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2009/_sbornik/PapersPdf/Bc/Urban_Marek.pdf)>
- [33] MERCEL. *Vliv tvaru řezné hrany nástroje na průběh řezného procesu* [online]. 2009 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z WWW: <[http://www.mercel.cz/mercelcz\\_files/drsnost\\_povrchu.pdf](http://www.mercel.cz/mercelcz_files/drsnost_povrchu.pdf)>
- [34] SECO TOOLS. *Příručka pro technology: Proces obrábění kovů - vliv geometrie* [online]. 2012 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <[https://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/8/Seco\\_09.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/8/Seco_09.pdf)>
- [35] SANDVIK COROMANT. *Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN* [online]. 2012 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/C-2940-137.pdf>>
- [36] PODANÝ, Pavel a Antonín KŘÍŽ. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev* [online]. Hradec nad Moravicí, 2006 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <[http://www.ateam.zcu.cz/podany\\_metal06.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/podany_metal06.pdf)>
- [37] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky* [online]. 2007 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/mechanicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky.html>>
- [38] ODDĚLENÍ POVRCHOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Integrita povrchu ostří nástroje ze slinutého karbidu* [online]. Plzeň [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <[http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz\\_str\\_tech\\_2015\\_text.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_str_tech_2015_text.pdf)>
- [39] ISCAR. *ECatalog* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3600863&fnum=337&mapp=IS>>

- [40] SPS VÍTKOVICE. *Základní pojmy obrábění* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <[http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-5\\_Zakladni\\_pojmy\\_obrabeni\\_RAJ.pdf](http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-5_Zakladni_pojmy_obrabeni_RAJ.pdf)>
- [41] HOMEL VŠB-TUO. *Měření opotřebení nástrojů* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_05.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf)>
- [42] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!* [online]. 2012 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>>
- [43] BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <[http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)>
- [44] OVMT. *Drsnost povrchu* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<file:///C:/Users/Admin/Downloads/Drsnost%20povrchu.pdf>>
- [45] CLEMSON UNIVERSITY. *Volumetric Tool Wear (VTW) Modeling* [online]. 2012 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.clemson.edu/manufacturing-lab/Projects/Mathew-Kuttolamadam/VTW.htm>>
- [46] MATERIAL ARCHIV. *Aluminium CuMg-Knetleg. EN AW-2014: Materialbeschreibung* [online]. 2011 [cit. 2016-04-30].
- [47] DGM MORI. *NLX 2500: Reaching To the Top of Lathe Turning* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://uk.dmgmori.com/products/lathes/universal-lathes/nlx/nlx2500+700#Intro>>

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 0-5 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,2 \text{ mm}$ )
<b>Příloha 2</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 10-15 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,2 \text{ mm}$ )
<b>Příloha 3</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 20-25 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,2 \text{ mm}$ )
<b>Příloha 4</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 0-5 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,4 \text{ mm}$ )
<b>Příloha 5</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 10-15 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,4 \text{ mm}$ )
<b>Příloha 6</b>	Opotřebení VBD se zaoblením břitu 20-25 $\mu\text{m}$ ( $f = 0,4 \text{ mm}$ )